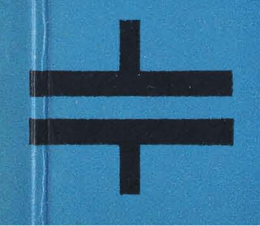
DER JUNGE FUNKER

Vom Detektor zum Superhet

Herausgegeben von Horst Kaczmarek TEIL I





10

Der junge Funker · Band 10

Vom Detektor zum Superhet
Teil I

Vom Detektor zum Superhet

TEIL I

Herausgegeben
von Horst Kaczmarek

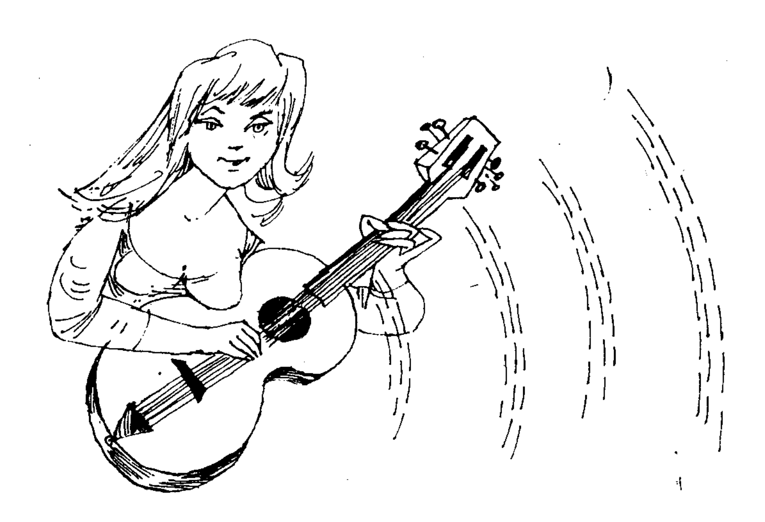


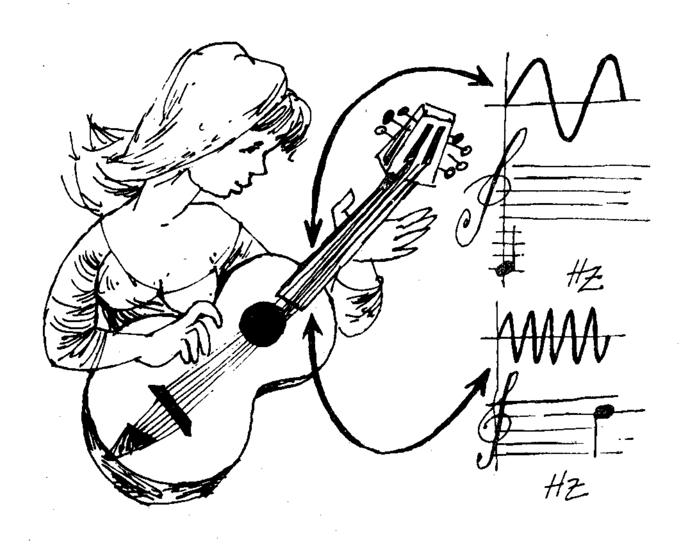
Deutscher Militärverlag

Diesen drei Broschüren liegt als Idee die Veröffentlichung „Шаг за шагом“ in der sowjetischen Zeitschrift „Радио“ zu Grunde.

1. Der Schall und seine Fortpflanzung

Haben Sie schon einmal darüber nachgedacht, was eigentlich ein Laut ist und wie das gesprochene Wort den Gesprächspartner erreicht?
Die Laute unserer Stimme sind genau wie alle anderen uns umgebenden Geräusche Luftschwingungen oder mit anderen Worten *Schallwellen.* Wir schlagen die Saite einer Gitarre an, sie beginnt, sich zu bewegen, und versetzt die sie umgebende Luft in Schwingungen. Die Luft um die Saite wird einmal verdichtet und zum anderen verdünnt. Es bilden sich Luftdruckänderungen, die weiter und weiter fortgetragen werden. Die erzeugte Tonhöhe hängt außer von der Spannung und dem Werkstoff auch von der Dicke der Saite ab. Die dickste





Saite unserer Gitarre schwingt langsam und ruft auch nur langsame Schallschwingungen hervor. Sie erzeugt einen tiefen Ton. Je dünner wir die Saite wählen, um so beweglicher wird sie und um so schneller (in einer höheren Tonlage) schwingt sie. Ähnliche schnelle und langsame Schallschwingungen können wir mit unseren Sprachorganen während der Unterhaltung erzeugen, denn hier treten etwa die gleichen Erscheinungen auf: Der Luftstrom aus den Lungen erzeugt mit Hilfe der Stimmbänder, der Lippen, der Zähne, des Kehlkopfs und der Nasen-Rachenhöhle die gewünschten Schallschwingungen. Eine andere Art von Wellen wird sichtbar, wenn man einen Stein ins Wasser geworfen hat.

Um die Größe der Schwingungen zu kennzeichnen, hat man einen genaueren Begriff, die *Frequenz*, eingeführt. Die Frequenz gibt uns an, wieviel Schwingungen auf eine Sekunde entfallen. Die Maßeinheit der Frequenz ist das *Hertz*, benannt nach dem bekannten deutschen Physiker. Ein Hertz (abgekürzt schreibt man Hz) entspricht einer Schwingung je Sekunde. Größere Maßeinheiten der Frequenz sind das Kilohertz

(1 kHz=1000 Hz) und das Megahertz (1 MHz=1000000 Hz). Alle diese Einheiten können wir für Frequenzmessungen beliebiger Schwingungen, unabhängig von ihrer physikalischen Herkunft, verwenden. In Hertz messen wir sowohl die Schwingungen der Saite eines Instruments, die *Schallfrequenz*, als auch die *Wechselstromfrequenz*.

Schallwellen nehmen wir mit unserem Gehörorgan, dem Ohr, wahr. Feine Nervenstränge übertragen die aufgenommenen Signale an das Gehirn und vermitteln auf diese Weise den Eindruck des gehörten Lautes.

Wir unterscheiden die Laute nach verschiedenen Merkmalen. So unter anderem nach ihrer Dauer, Lautstärke und Frequenz. Bestimmte Lautkombinationen verschiedener Dauer, Lautstärke und Frequenz ergeben zum Beispiel eine gern gehörte Melodie, ein bekanntes Wort, das Brummen eines Motors oder das Rauschen des Meeres.

Das menschliche Ohr ist in der Lage, Schallschwingungen mit Frequenzen von etwa 20 Hz bis 20000 Hz aufzunehmen. Schallwellen mit Frequenzen über 20 kHz (*Ultraschall*) und unter 20 Hz (*Infraschall*) können wir nicht mehr hören. Diese Grenzen sind streng genommen nicht für jeden Menschen gleich.

In der Regel kommen wir allerdings bei Musiksendungen mit oberen Frequenzen von 10 kHz und sogar 5 kHz und unteren Frequenzen von 30 bis 70 Hz aus. Um das gesprochene Wort während der Unterhaltung noch befriedigend aufzunehmen, reichen Schallschwingungen von 300 bis 3400 Hz aus. Die Sprache ist auch dann noch zu verstehen, wenn die Schallwellen im Bereich von 1500 Hz liegen.

Das menschliche Ohr ist ein ausgezeichnetes Organ. Es nimmt selbst unbedeutende Frequenzänderungen eines Lautes wahr. Es reicht zum Beispiel aus, wenn sich eine bestimmte Tonfrequenz um Bruchteile eines Prozents ändert, damit unser Ohr darauf anspricht. Unser Ohr ist darüber hinaus auch für schwache Laute sehr empfindlich. Es registriert Laute, die einen Druck von 0,0000003 p/cm^2 auf das Trommelfell aus-

üben. Bei diesem schwachen Schall bewegt sich das Trommelfell mit einer Amplitude von nicht mehr als 1/10000000 mm. Trotz dieser hohen Empfindlichkeit unseres Gehörs können wir uns mit einem Gesprächspartner nur über kurze Entfernungen unterhalten.

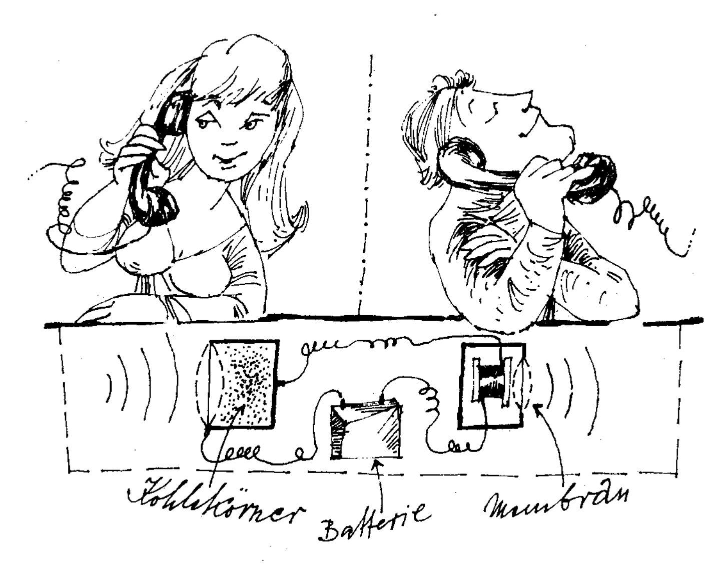
2. Die elektrische Tonübertragung

Jeder hat schon einmal ein Telefongespräch geführt, bei dem am anderen Ende der Fernsprechleitung, oftmals weit entfernt, der gewünschte Teilnehmer unsere Stimme vernahm. Auf welche Weise wird nun das gesprochene Wort, das doch sonst nicht weiter als einige zehn Meter zu hören ist, auf einer Telefonleitung über hunderte und tausende Kilometer geleitet? Ist es möglich, daß der kleine Telefonapparat die bei einem Telefongespräch erzeugten Schallschwingungen auf derartig große Entfernungen überträgt? Selbstverständlich kann er das nicht! Zur Gesprächsübertragung dient vielmehr *der elektrische Strom*, der durch Leitungen, die die beiden Telefone verbinden, fließt.

Im Handapparat unseres Telefons befindet sich ein *Mikrofon* - das heißt eine kleine Kapsel mit Kohlekörnchen, die eine dünne Kohleplatte abschließt.

Das Mikrofon ist so in den Telefonkreis eingeschaltet, daß durch die Kohlekörner ununterbrochen Strom fließt. Während unseres Telefongesprächs ändert sich der Schalldruck auf die Kohlekörner und damit der elektrische Widerstand des Mikrofons. Die dicht zusammengedrängten Kohlekörner leiten den Strom besser, als wenn sie aufgelockert sind. *Die Widerstandsänderungen des Mikrofons rufen entsprechende Stromänderungen hervor.*

Am anderen Ende der Telefonleitung ist die *Hörkapsel* unseres Gesprächsteilnehmers angeschlossen, die eine dünne *Stahlmembran* enthält. Unter dem Einfluß des Stromes, der durch die Spule in der Hörkapsel fließt, wird die Membran im Rhythmus der Stromänderungen stärker oder schwächer von der Spule angezogen. Die Membran schwingt und erzeugt Schall-



schwingungen, die nahezu denen entsprechen, die wir vor dem Mikrofon erzeugt haben.
So gehen während eines Telefongesprächs zwei grundsätzliche Wandlungen vor sich:
— auf der sendenden Seite werden mit Hilfe des Mikrofons Schallwellen in elektrische Schwingungen,
— auf der empfangenden Seite die elektrischen Schwingungen wieder in Schallwellen umgewandelt.
Zwischen unserem Mikrofon und der Hörkapsel des angerufenen Teilnehmers fließt nur der elektrische Strom. Die Zweckmäßigkeit dieser Umwandlungen liegt klar auf der Hand: das elektrische Signal — das ist der im Rhythmus der Tonfrequenz schwankende Strom — überbrückt große Entfernungen in kürzester Zeit, denn seine Signalfortpflanzung ist fast eine Million mal schneller als der Schall.
Was tun wir aber, wenn wir eine Nachrichtenverbindung ohne Telefonleitung zu einem Flugzeug, zu einem Schiff, zu den Ufern der Antarktis oder zu einem kosmischen Raumschiff herstellen sollen?

Hierbei helfen uns die *Funkverbindungen* mit ihren hervorragenden Eigenschaften. Auf diesen Verbindungen können wir unsere elektrischen Signale ohne Drahtleitung mit Hilfe der *elektromagnetischen Wellen*, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum bewegen, übertragen.

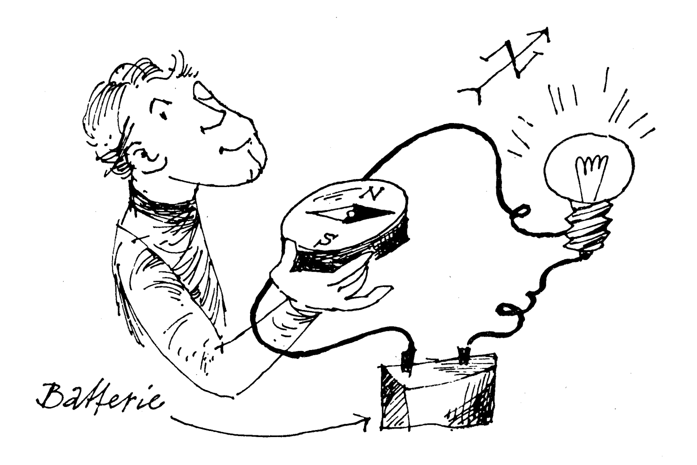
3. Einiges über die drahtlose Signalübermittlung

Die kompliziertesten Begriffe, mit denen wir beim Studium der Elektrotechnik und der Funktechnik Bekanntschaft machen, sind die des *elektrischen*, *magnetischen* und des *elektromagnetischen* Feldes. Eine Vorstellung über sie erhalten wir am besten durch einige einfache Versuche. Diese können wir dann später mathematisch und physikalisch begründen. *Ein elektrisches Feld entsteht um jeden elektrisch geladenen Körper.* Ein Körper ist dann elektrisch geladen, wenn man ihn mit einem Pol einer Spannungsquelle verbindet. Das hat folgende Ursache: Der elektrische Strom stellt eine Bewegung kleinster Teilchen, der Elektronen, dar. Sie bewegen sich innnerhalb der Spannungsquelle von der *Pluselektrode* zur *Minuselektrode* und „drücken" gewissermaßen auf sie. *Am Minuspol entsteht damit ein Elektronenüberschuß, am Pluspol ein Elektronenmangel.* Verbindet man jetzt die beiden Pole außerhalb der Spannungsquelle miteinander, so fließt ein Strom vom negativen zum positiven Pol. Verbindet man einen Körper mit nur einem Pol, dann zwingt der Pol entweder seinen Elektronenüberschuß dem Körper auf oder entzieht ihm Elektronen, je nach Polarität. Der Körper ist dann entweder positiv oder negativ geladen.

Es gibt auch Möglichkeiten, ohne Spannungsquelle eine Ladung zu erzeugen. Unternehmen wir einen kleinen Versuch: Wir reiben einen gewöhnlichen Kamm mit einem Wollappen und erzeugen durch diese Reibung einen Überschuß an negativen Ladungsträgern. Der Raum um unseren Kamm hat jetzt besondere Eigenschaften. Kleine Papierstückchen die in diesen Raum gelangen, bewegen sich zum Kamm hin.



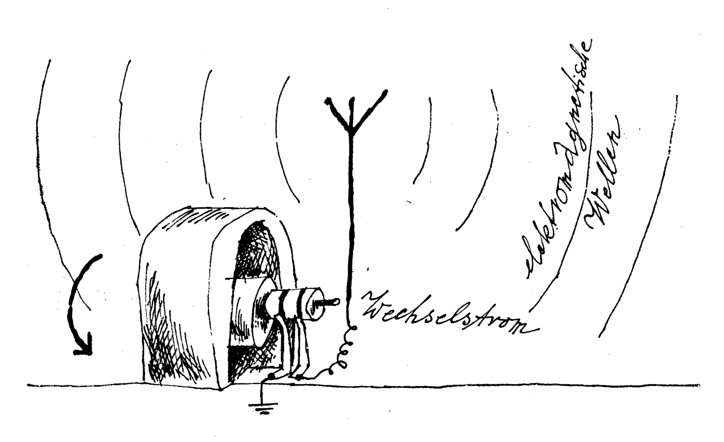
Welche Ursachen hat das? Kann es sein, daß die elektrischen Kräfte mit Hilfe der im Raum befindlichen Luftteilchen übertragen werden? Keinesfalls! Denn wenn wir den Raum um unseren Kamm luftleer pumpen und den Versuch wiederholen, werden die Papierstückchen genauso wie in der Luft oder in einem anderen Gas angezogen. Mit anderen Worten heißt das, die Moleküle, die Atome oder andere Bestandteile des Mediums, in dem sich der Kamm befindet, haben keine Bedeutung für das elektrische Feld. Um unseren Kamm herrscht also ein besonderer Zustand des Raumes, eine besondere Form der Materie, die die elektrischen Kräfte überträgt. Diese besondere Form der Materie, die neben den uns bereits bekannten Formen der Materie, wie die der Stoffe, existiert, ist *das elektrische Feld.*
Eine ebenso große Bedeutung hat *das magnetische Feld.* Ein magnetisches Feld entsteht als Folge der Bewegung elektrischer Ladungen. Davon kann man sich überzeugen, wenn ein Kompaß an einen stromdurchflossenen Leiter gehalten wird: Die Kompaßnadel stellt sich quer zum Leiter. Genauso wie das durch einen stromdurchflossenen Leiter verursachte magnetische Feld wird auch das Magnetfeld der Erde und werden die magnetischen Felder von Permanentmagneten durch die Bewegung elektrischer Ladungen hervorgerufen.



Das magnetische Feld enthält wie das elektrische Feld eine bestimmte Energie (in unserem Beispiel wird ein Teil dieser Energie für die Bewegung der Kompaßnadel verbraucht). Das elektrische und das magnetische Feld sind also eng mit den elektrischen Ladungen verbunden:
Entfernen wir die elektrische Ladung, so verschwindet allmählich das elektrische Feld, unterbrechen wir den Stromfluß, so entfällt das magnetische Feld.
Darüber hinaus besteht aber noch eine andere Möglichkeit, ein elektrisches und ein magnetisches Feld, genauer *das elektromagnetische Feld*, zu erzeugen:

4. Elektromagnetische Wellen

Ein elektromagnetisches Feld entsteht bei jeder beliebigen, sogar bei der geringsten Stromänderung in einem Leiter. Dadurch, daß es sich mit dem Strom verändert, beeinflußt es benachbarte Gebiete des Raumes, überträgt eine bestimmte Energie, so daß in ihnen ebenfalls ein elektromagnetisches Feld entsteht. Diese *elektromagnetische Welle* bewegt sich nach allen Seiten mit einer großen Geschwindigkeit — 300 000 Kilometer in der Sekunde — weiter und weiter vom Leiter weg. Fließt in einem Leiter *Wechselstrom* (z.B. in einer Antenne), dann löst sich von dem Leiter eine elektromagnetische Welle nach der anderen. Wir stellen uns das so vor, als hätten wir einen Stein ins Wasser geworfen und beobachteten anschließend die Wasserwellen, die sich nach allen Seiten ausbreiten.





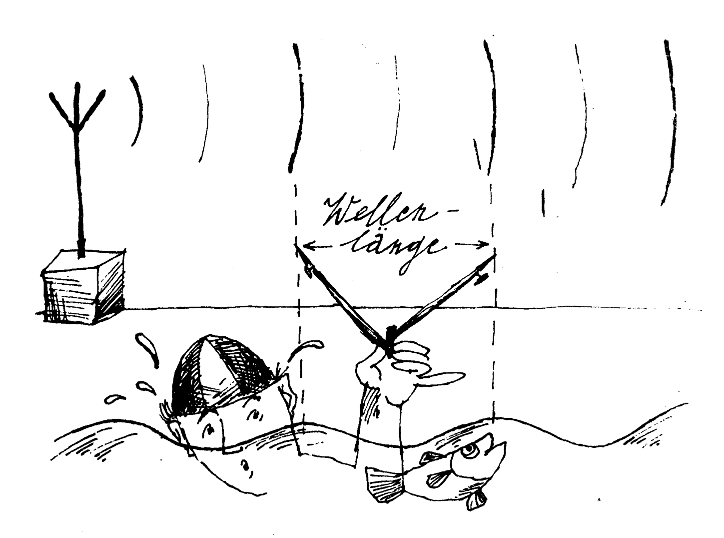
Die *elektromagnetischen Wellen,* also in unserem Fall die *Funkwellen,* sind nicht wie die elektrischen oder magnetischen Felder mit ihrer Ausgangsquelle verbunden: sie breiten sich frei im Raum aus und können gewaltige Entfernungen überbrücken. Ein Beispiel dieser elektromagnetischen Wellen sind die Lichtstrahlen, die bekanntlich sogar von fernen Sternen zu uns gelangen.

Ein wichtiges Kennzeichen der elektromagnetischen Strahlung wie jedes anderen Wellenprozesses ist die *Wellenlänge* λ (Lambda). Sehr einfach können wir die Wellenlänge der Wellen die ein in das Wasser geworfener Stein verursacht,





bestimmen: *die Wellenlänge ist dabei der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen oder Wellentälern.*
Analog verhält es sich mit der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung: sie ist der Abstand zwischen zwei nächstgelegenen Punkten, an denen das elektromagnetische Feld zu gleichen Zeiten mit der größten Kraft in einer Richtung wirkt.



Die Wellenlänge ist von der *Frequenz f* des Wechselstroms, der die Strahlung verursacht, abhängig. Je höher die Frequenz ist, um so häufiger folgt eine Welle der anderen, so daß der Abstand zwischen ihnen kleiner wird. Außerdem hängt λ noch von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen ab. Je schneller sich die Wellen ausbreiten, um so größere Entfernungen durcheilen sie in der Zeit einer Periode (eines vollen Zyklus) des Wechselstroms in der Antenne. Daraus folgt, daß der Abstand zwischen Welle und Welle zunimmt.

Die Abhängigkeit der Wellenlänge λ elektromagnetischer Wellen von der Frequenz f drücken folgende Formeln aus:

$$\lambda = \frac{c}{f}; \quad f = \frac{c}{\lambda};$$

λ in km, c in km/s, f in Hz; c bedeutet in unserem Fall die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen (Lichtgeschwindigkeit), die etwa gleich 300000 km/s ist.

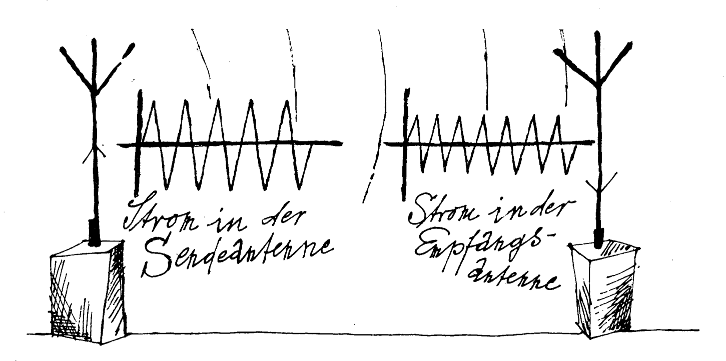
Bringen wir jetzt innerhalb des Ausbreitungswegs der elektromagnetischen Wellen einen Leiter an (wir können diesen Leiter auch als Empfangsantenne bezeichnen), dann induziert die elektromagnetische Strahlung in diesem Leiter eine *Spannung*. Diese Spannung ändert, wie bereits bekannt, ununterbrochen ihre Richtung und Stärke, und zwar mit der gleichen Frequenz wie der Strom in der Sendeantenne.

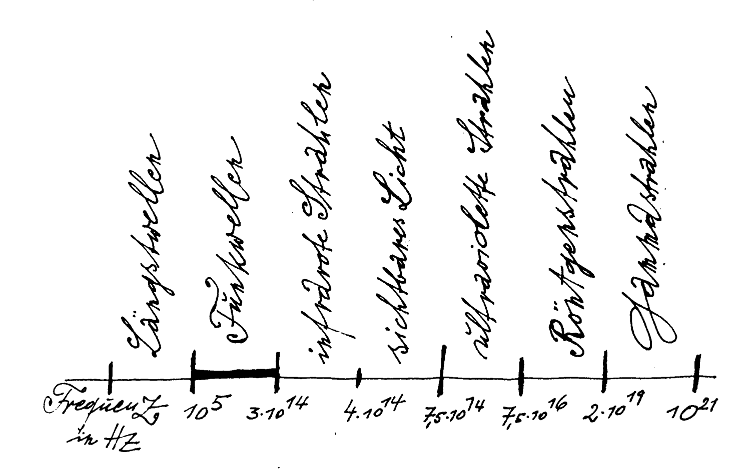
Wir können also mit Hilfe des Wechselstroms in der Sendeantenne, wenn auch nicht mit der gleichen Stärke, einen Wechselstrom in der Empfangsantenne erzeugen. *Die elektromagnetischen Wellen ermöglichen eine Verbindung zwischen den beiden Antennen ohne Verbindungsleitungen.*

Jetzt steht vor uns die Aufgabe, diese Nachrichtenverbindung zu untersuchen und sie am zweckmäßigsten für die Nachrichtenübermittlung auszunutzen.

5. Die Nachrichtenüber ıgung

Wir haben bereits festgestellt, daß man eine Funkverbindung herstellen könnte, indem man in die Sendeantenne ein Mikrofon und in die Empfangsantenne ein Telefon (Kopfhörer) einschaltet.
Dieses Nachrichtensystem wäre aber praktisch nicht zu verwerten. Ein Grund dafür ist, daß man für diese Funkverbindung Antennen bauen müßte, die zehn und hundert Kilometer lang sind, da die Antennenlänge der Wellenlänge angepaßt werden muß, die bei den geringen Tonfrequenzen recht groß ist.
Für eine effektive Abstrahlung darf die Länge der Sendeantenne 5 bis 10 % der Wellenlänge nicht überschreiten. Günstig ist es noch, wenn die Antennenlänge $\lambda/2$ oder im äußersten Fall $\lambda/4$ beträgt.
Für kommerzielle Funkverbindungen und beim Rundfunk benutzt man in der Regel Funkwellen mit Wellenlängen von mehr als 2000 m, das entspricht einem Wechselstrom von mehr als 150 kHz.





LW						
f kHz	150	200	250	300	350	415
λ m	2000	1500	1200	1000	857	723

MW						
f kHz	520	600	800	1000	1200	1600
λ m	577	500	375	300	250	187,5

KW						
f MHz	3,85–4	4,85–5,1	5,9–6,2	7,1–7,3	9,5–9,8	11,7–12
λ m	78–75	62–59	51–48	42–41	31,6–30,6	25,6–25

UKW						
f MHz	64,5	66	68	70	72	73
λ m	4,65	4,5	4,41	4,28	4,17	4,11

Rundfunkbereiche

6. Senderauswahl und Modulation

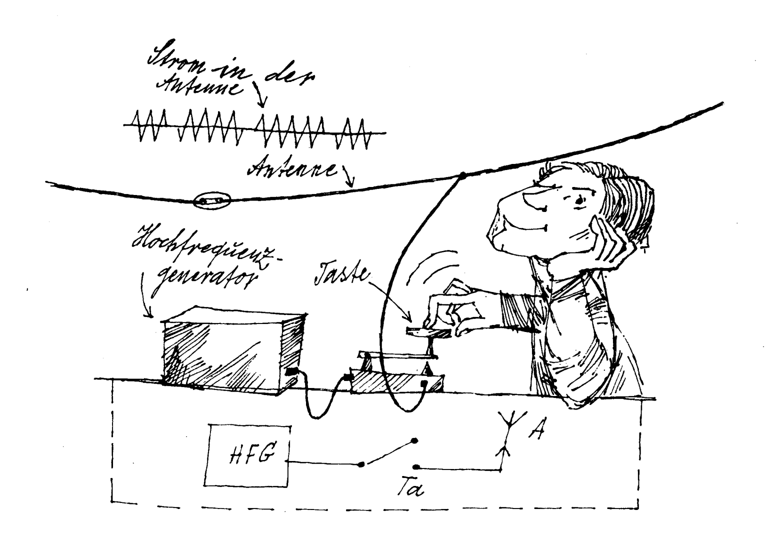
Um aber am Empfangsort die Signale eines Senders von denen eines anderen unterscheiden zu können (die Antenne empfängt ja die Funkwellen von vielen Sendern), strahlt jeder Sender auf einer bestimmten Frequenz. Der Abstand von Rundfunksender zu Rundfunksender in einem Frequenzband beträgt 9 kHz. Die Frequenzen der Telegrafiesender liegen gewöhnlich dichter beieinander.

Für den Betrieb von Rundfunksendern unterscheidet man 4 Wellenbereiche:

Langwellenbereich (LW),
Mittelwellenbereich (MW),
Kurzwellenbereich (KW),
Ultrakurzwellenbereich (UKW)

Langwellen- und Mittelwellenbereich werden fast ausschließlich dem Rundfunk vorbehalten. Im Kurzwellenbereich dagegen sind Rundfunksender nur vereinzelt zu finden und im UKW-Bereich nur auf einem Band. Aber in diesem einen Band kann man bedeutend mehr Rundfunkstationen unterbringen als im ganzen Langwellenbereich. Sogar ungeachtet dessen, daß die Frequenzen von UKW-Rundfunksendern einen Frequenzabstand von jeweils 200 kHz haben müssen.

Fassen wir zusammen: *Für Funkverbindungen können wir Hochfrequenzströme verwenden, die sehr leicht und intensiv elektromagnetische Wellen abstrahlen.* Diese Ströme werden von speziellen *Hochfrequenzgeneratoren* in den Sendern erzeugt. Wenn es uns jetzt gelingt, den Strom in der Antenne in irgendeiner Weise zu steuern (d.h., die Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen zu beeinflussen), so können wir mit den Funkwellen Nachrichten übertragen.



Am einfachsten lassen sich Nachrichten mit Hilfe des *Morsealphabets* übertragen. Hierzu brauchen wir lediglich eine Taste, die in den Antennenstromkreis eingeschaltet wird und mit der der Strom im Sinne der Morsezeichen gesteuert werden kann.
Um eine einfache Funksprechübertragung zu ermöglichen (d.h., Sprache oder Musik zu übertragen), kann man in den Stromkreis der Sendeantenne ein einfaches Kohlemikrofon schalten. Der Mikrofonwiderstand ändert sich abhängig von den Schallwellen und beeinflußt auf diese Weise den Hochfrequenzstrom in der Antenne. Die Intensität der abgestrahlten elektromagnetischen Wellen ändert sich im Rhythmus unserer Sprache oder Musik.
Die Steuerung des Hochfrequenzstroms durch Schallschwingungen bezeichnet man als *Modulation.* Heutzutage finden wir das Mikrofon bei keinem Sender mehr im Antennenstromkreis. Es liegt vielmehr in einem Niederfrequenzstromkreis, von wo aus die verstärkte Niederfrequenz der Modulationsstufe und dann dem Antennenstromkreis übertragen wird.

Strom in der Antenne

Antenne

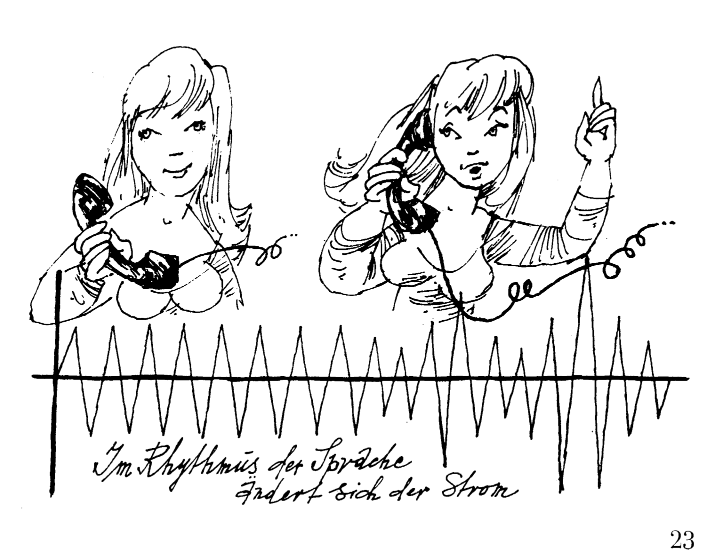
Mikrofon

HF-Generator

HFG

Mi

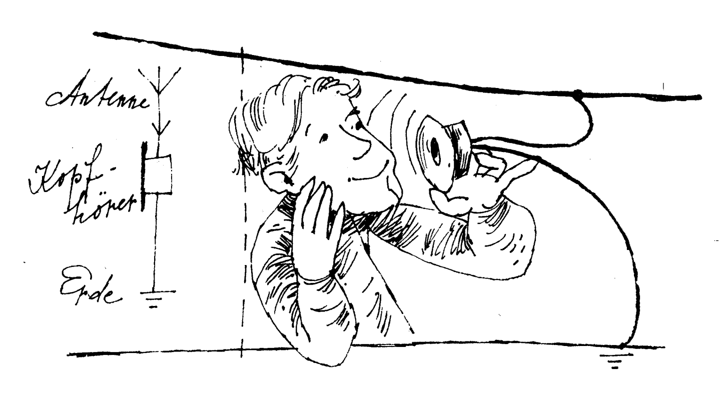
A



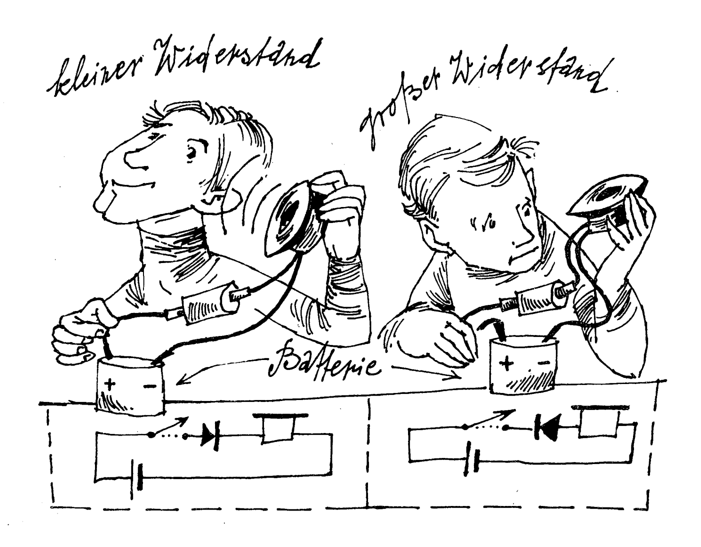
Unabhängig davon, wie die Modulation erfolgt, werden die in das Mikrofon gesprochenen Worte sozusagen mit Hilfe der elektromagnetischen Wellen *chiffriert.* Das geschieht ähnlich wie das *Chiffrieren* des gesprochenen Wortes mit Hilfe des Stromes in unserer Telefonleitung.
Jetzt werden wir vor die Aufgabe gestellt, im Empfänger die übertragene Nachricht zu *dechiffrieren,* mit anderen Worten: wieder Schallschwingungen zu erzeugen.

7. Der Detektor als Demodulator

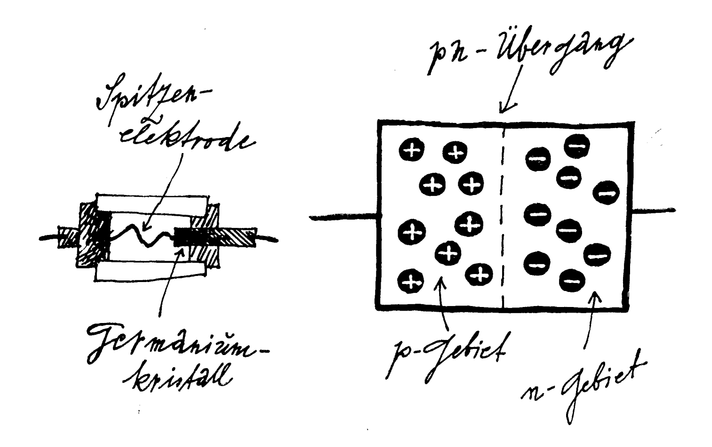
Wir wissen schon, daß die elektromagnetischen Wellen in unserer Empfängerantenne einen Wechselstrom erzeugen. Dieser Strom hat die gleiche Frequenz wie der Strom in der Sendeantenne und ist auch genauso moduliert. Versuchen wir, analog zur Telefonleitung das elektrische Signal gleich in Schallschwingungen umzuwandeln. Zu diesem Zweck leiten wir den Wechselstrom aus der Antenne sofort zu unserem Kopfhörer. Beginnt dabei die Membran zu schwingen und sind die Worte zu hören, die in diesem Moment in das Mikrofon gesprochen werden?
In der Empfangsantenne wie in der Sendeantenne fließt hochfrequenter Strom mit einer Frequenz von 150 kHz und mehr. Die Membranen in unseren Kopfhörermuscheln können aber durch ihre Trägheit nicht mit derartig hohen Frequenzen schwingen. Selbst wenn wir einen Kopfhörer hätten, der diese hohen Frequenzen wiedergäbe, könnte unser Ohr sie nicht



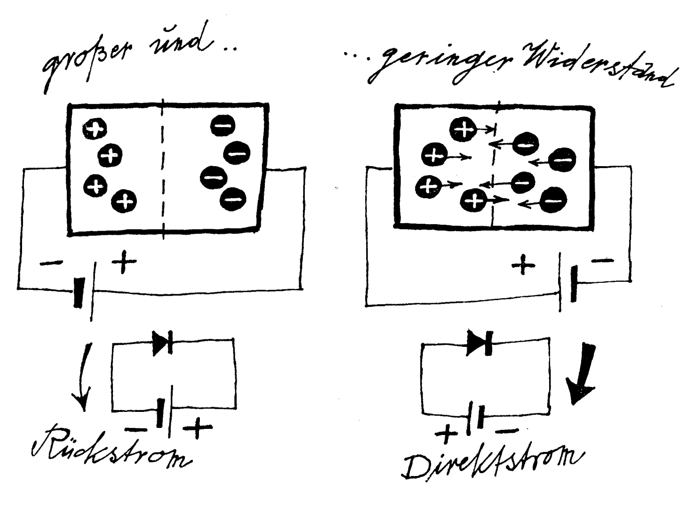
aufnehmen. Wir brauchen die niederfrequenten Schallschwingungen, mit denen die Hochfrequenz im Sender moduliert wurde.
Wie läßt sich diese Aufgabe lösen? Wir müssen den Hochfrequenzstrom, der in der Empfangsantenne vorhanden ist, so umwandeln, daß man das Signal, mit dem der Hochfrequenzstrom moduliert wird, aussieben kann. Mit anderen Worten, wir müssen die Veränderungen im Hochfrequenzstrom rückgängig machen, die durch das Sprechen in das Mikrofon auf der sendenden Seite entstanden sind. Der HF-Strom muß *demoduliert* werden.
Die erforderliche Umwandlung des Hochfrequenzstroms kann mit Hilfe des *Detektors* erfolgen. Dieser ist im engeren Sinne ein Halbleiterkristall, auf den eine Metallspitze gesetzt wird (*Spitzendiode*). Im weiteren Sinne rechnet man auch *Elektronenröhren* (Dioden), *Germanium- und Siliziumdioden* dazu, da sie die gleiche Funktion erfüllen. Diese letztgenannten Dioden werden heute in der Funktechnik fast ausschließlich eingesetzt.
Die wichtigste Eigenschaft einer beliebigen Diode besteht darin, daß sie den Strom in einer Richtung sehr gut leitet, in entgegengesetzter Richtung jedoch kaum leitfähig ist. Man könnte ihn auch mit einem Fahrradventil vergleichen. Wenn wir Luft aufpumpen, gelangt Luft in den Schlauch. Sie kann ihn aber bei geschlossenem Ventil nicht verlassen. Im Bild auf S. 27 würde ein Strom in Durchlaßrichtung die Membran des Hörers anziehen und ein Knacken verursachen. Wie eine Röhrendiode arbeitet, wird später beschrieben. Zunächst betrachten wir eine Halbleiterdiode.
Die wichtigsten Teile einer Halbleiterdiode sind ein kleiner Germaniumkristall (oder Siliziumkristall) und die obenerwähnte, mit dem Kristall verbundene, dünne Metallnadel. Es gibt zwei verschiedene Arten von Halbleiterdioden: *Spitzendioden*, bei denen die Auflagefläche der Metallspitze auf dem Germaniumkristall nur einige Quadratmikron ausmacht, und *Flächendioden*, bei denen die Auflagefläche der Metallschicht



bedeutend größer ist. Als Detektor können wir nur Spitzendioden verwenden (*0A 625, 0A 645, 0A 665, 0A 685, 0A 705 u.a.*).
Bei der Herstellung einer Halbleiterdiode entsteht an der Berührungsstelle der Kontaktspitze mit dem Kristall ein sogenannter *pn-Übergang* (siehe Bild S. 28). An der Kontaktspitze bildet sich das *p-Gebiet* (von dem Wort positiv abgeleitet), weil dort sehr viele ungesättigte Atome vorhanden sind, die man als positive Ladungen betrachten kann. Dann folgt das *n-Gebiet* (von dem Wort negativ abgeleitet), in dem ein Überschuß an negativen Ladungsträgern (Elektronen) vorherrscht. Sobald wir an den pn-Übergang eine Spannung anlegen, und zwar den Minuspol an das p-Gebiet, den Pluspol an das n-Gebiet, werden die elektrischen Ladungen von der Grenze der beiden Gebiete abgezogen. Zwischen beiden Gebieten entsteht eine Zone verminderter freier elektrischer Ladungen, d.h. eine Zone, die sehr schlecht Strom leitet und fast die Eigenschaften eines Isolators aufweist. Auf diese Weise fließt beim Anschalten der Batterie an den pn-Übergang kein



Strom durch ihn. Wir können die Diode in diesem Zustand als einen sehr großen Widerstand betrachten.
Wenn man nun die Batterie umpolt, d.h. den Pluspol mit dem p-Gebiet und den Minuspol mit dem n-Gebiet verbindet, dann fließen die elektrischen Ladungen (sowohl die positiven als



auch die negativen) sehr dicht an die Grenze zwischen den beiden Gebieten heran. Sie überwinden die Grenze und bewegen sich zu den entsprechenden Batterieanschlüssen. In diesem Fall leitet der pn-Übergang den Strom sehr gut, und die Diode hat nur einen kleinen Widerstand. *Halbleiterdioden*, wie auch andere Bauelemente mit einseitiger Leitfähigkeit, bezeichnet man oft als elektrische Ventile.

Von der einseitigen Leitfähigkeit einer Diode können wir uns leicht in der Praxis überzeugen. Hierzu bauen wir einen einfachen Stromkreis aus einer Diode, den Kopfhörern (die Kopfhörer müssen hochohmig sein, d.h., 1000 Ω und mehr aufweisen) und einer Taschenlampenbatterie auf. Ist die Diode so geschaltet, daß sie Strom durchläßt, dann wird in dem Moment, wenn man den Stromkreis schließt, in den Kopfhörern ein starkes Prasseln zu hören sein. Ändern wir die Polarität der Diode, d.h., sie setzt jetzt dem Strom einen sehr großen Widerstand entgegen, so ertönt in den Kopfhörern kein Prasseln.

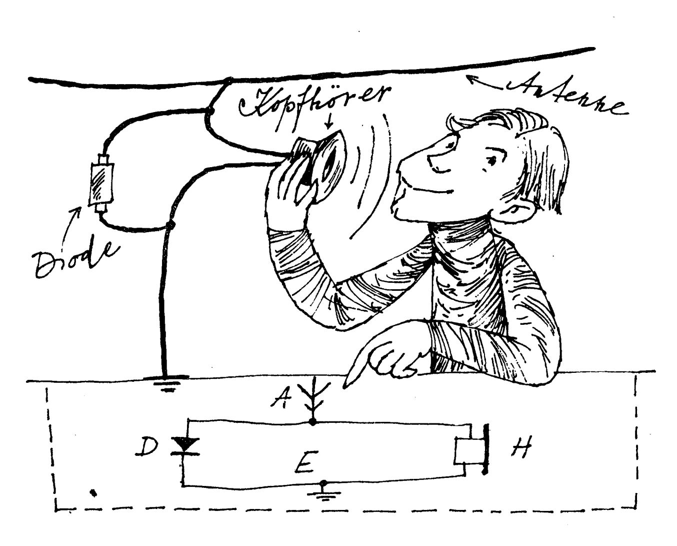
Die einseitige Leitfähigkeit der Diode ist die Eigenschaft, die uns gestattet, das Hochfrequenzsignal umzuwandeln, um anschließend die Niederfrequenzkomponente auszusieben.

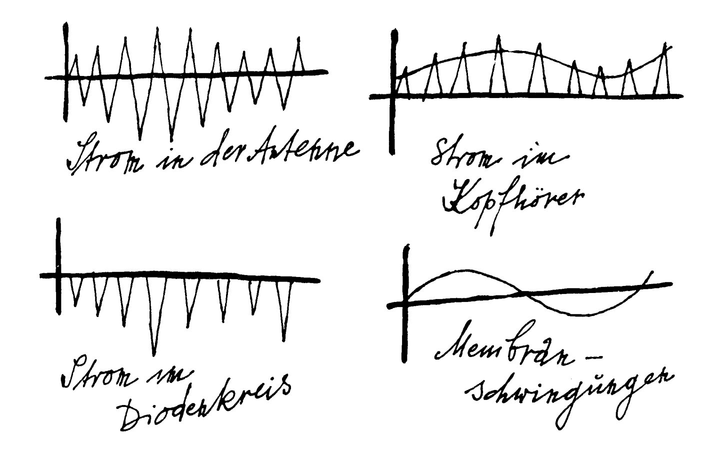
Wie das gemacht wird, werden wir erkennen, wenn wir uns mit der Wirkungsweise eines ganz einfachen *Empfängers* beschäftigen. Der Aufbau nimmt nicht viel Zeit in Anspruch.

8. Ein einfacher Detektorempfänger

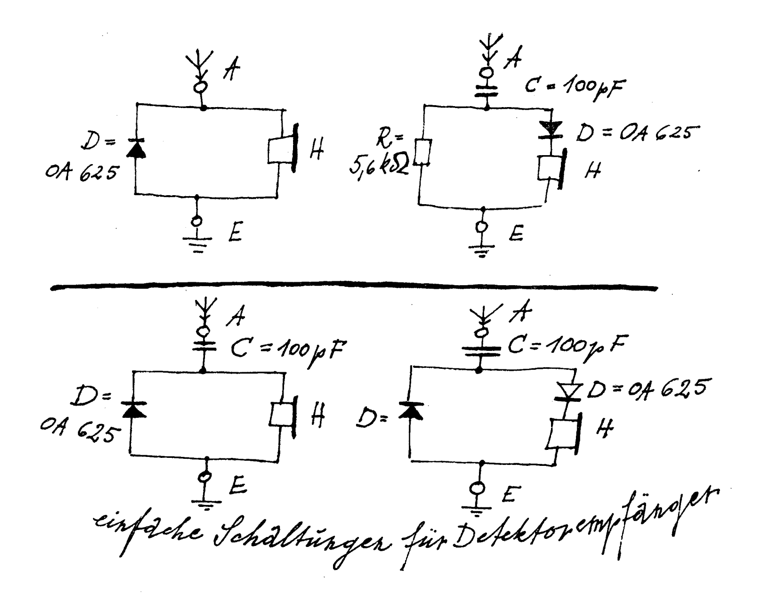
Bauen wir uns einen Detektorempfänger und untersuchen wir, wie er arbeitet. Die Schaltung des Empfängers ist äußerst einfach. Zwischen der Antenne und der Erde wird der Detektor eingeschaltet. Parallel zum Detektor schließen wir die Kopfhörer an. Grundsätzlich liegt jetzt bereits ein Empfänger vor. Die Antenne für einen Detektorempfänger soll möglichst hoch gespannt sein. Eine Erde, z.B. Anschluß an der Wasserleitung, muß man unbedingt haben.

Den Empfänger selbst bauen wir auf einem Stückchen Pertinax oder Sperrholz auf. Die Steckbuchsen für die Kopfhörer, die Antenne und die Erde erhalten wir in jedem Bastlerladen.





Wir haben bereits festgestellt, daß der Detektor Strom nur in einer Richtung durchläßt. Aus diesem Grund fließt der Wechselstrom, der in die Antenne induziert wird (i_A) während einer Halbwelle durch den Detektor (i_D) und während der zweiten Halbwelle durch unsere Kopfhörer (i_H): Im Detektorkreis und im Kopfhörerkreis fließt also pulsierender Strom. Die Stromimpulse gehen in beiden Stromkreisen in einer Richtung, wobei sich die Impulse im Rhythmus der Modulation verändern. Wegen der relativ geringen Frequenz der Stromimpulse schwingen die Membranen in den Kopfhörermuscheln und erzeugen Schallwellen. Dabei ändern sich die Impulse in Übereinstimmung mit der Modulation, aber das modulierende Signal kann eine Frequenz von einigen hundert Hertz haben. Eine solche Frequenz ist im Verhältnis zu der Frequenz des Stromes in der Antenne klein, da diese einige hundert oder gar tausend Kilohertz beträgt.
Unser Empfänger hat eine Reihe ernster Mängel. In erster Linie ist er sehr unempfindlich und erlaubt uns nur, Ortssender, und dabei wiederum nur die leistungsstarken, zu empfangen. Es kann deshalb der Fall eintreten, daß der Empfänger außer Gewitterentladungen überhaupt nichts wiedergibt.



Ein anderer Nachteil unseres einfachen Empfängers besteht darin, daß, wenn mehrere Stationen zu hören sind, wir keine Möglichkeit haben, eine von der anderen zu trennen.
So stehen also vor uns zwei neue Aufgaben:

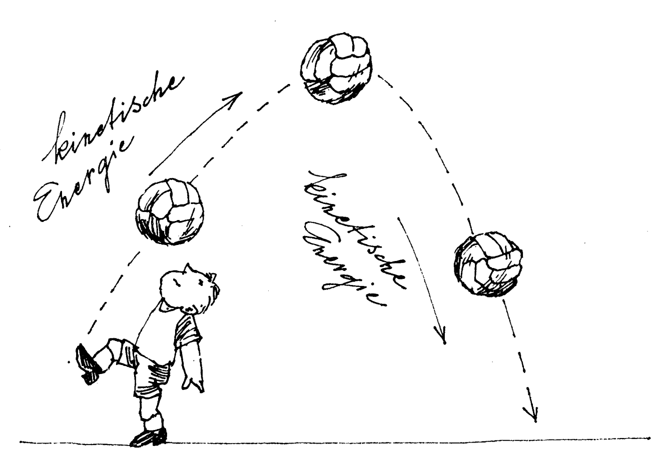
- —erstens müssen wir die Empfindlichkeit des Empfängers erhöhen, so daß auch schwach einfallende Rundfunkstationen noch zu hören sind;
- —zweitens ist der Empfänger so aufzubauen, daß wir aus den vielen Stationen jeweils eine bestimmte auswählen können.

Diese Aufgaben kann man auf verschiedene Weise lösen. Wir beginnen mit der einfachsten.
Das erste, was wir gegen diese Nachteile unternehmen können: wir bauen einen *Schwingkreis* in unserem Empfänger ein. Der Schwingkreis gestattet uns, die Spannung eines gewünschten Senders, die dem Detektor zugeführt wird, zu erhöhen. Somit wählt der Schwingkreis sozusagen aus der Vielzahl hochfrequenter Frequenzen eine aus, die von einer bestimmten Funk-

station ausgestrahlt wird. Diese Eigenschaft des Schwingkreises hängt mit den in ihm entstehenden elektromagnetischen Schwingungen zusammen (daher auch der Name Schwingkreis oder Schwingungskreis).
Bevor wir uns mit den elektromagnetischen Schwingungen im Schwingkreis vertraut machen, erinnern wir uns noch einmal an die mechanischen Schwingungen eines Pendels, einer Gitarrensaite, einer Schaukel oder eines Stahllineals, das in einen Schraubstock eingespannt ist. Obwohl die elektromagnetischen und die mechanischen Schwingungen grundverschiedener Natur sind, ähneln sich die Gesetze, nach denen Schwingungen ablaufen. Aus diesem Grund helfen uns die Kenntnisse über die mechanischen Schwingungen, die elektromagnetischen Schwingungen besser zu verstehen.

9. Energieumwandlung bei mechanischen Schwingungen

Ein Fußballspieler schießt den Ball kerzengerade in die Höhe. Der Fußball erreicht den Gipfelpunkt und fällt anschließend, von Sekunde zu Sekunde schneller werdend, zur Erde herab. Dabei treten Wandlungen der Energieformen des Balles auf. Während der Ball nach oben fliegt, geht *die kinetische Energie*, die Energie eines bewegten Körpers, (je weiter der Ball nach oben fliegt, um so kleiner wird seine kinetische Energie) in *potentielle Energie* über, Energie, die ein in die Höhe beförderter Körper enthält (je höher der Ball fliegt, desto größer ist seine potentielle Energie). Anschließend verwandelt sich die potentielle Energie, während der Ball nach unten fällt, wieder in kinetische Energie.
Derartige Umwandlungen der kinetischen und potentiellen Energie können wir auch an einem bewegten Pendel beobachten.



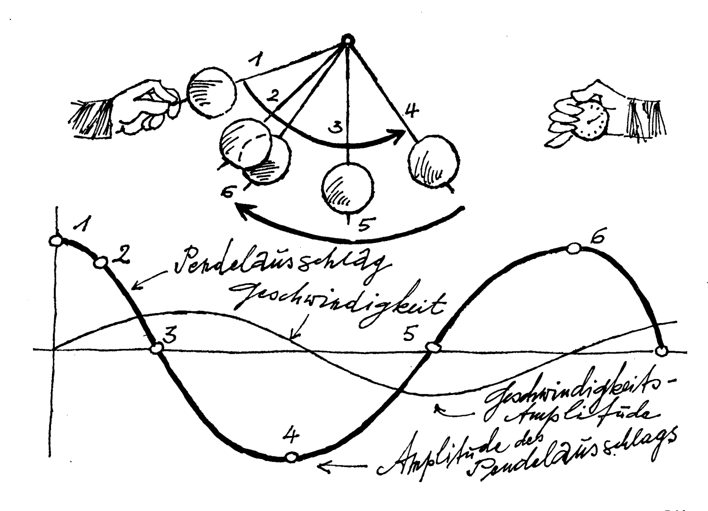
Nimmt das Pendel eine der beiden Endstellungen ein, so ist die potentielle Energie am größten, die kinetische Energie nimmt aber auf Grund der Geschwindigkeitsverringerung ab. Sobald das Pendel durch seine Trägheit die Senkrechte durchläuft — das Pendel gewinnt danach erneut wieder an Höhe —, geht die kinetische Energie langsam wieder in potentielle Energie über.

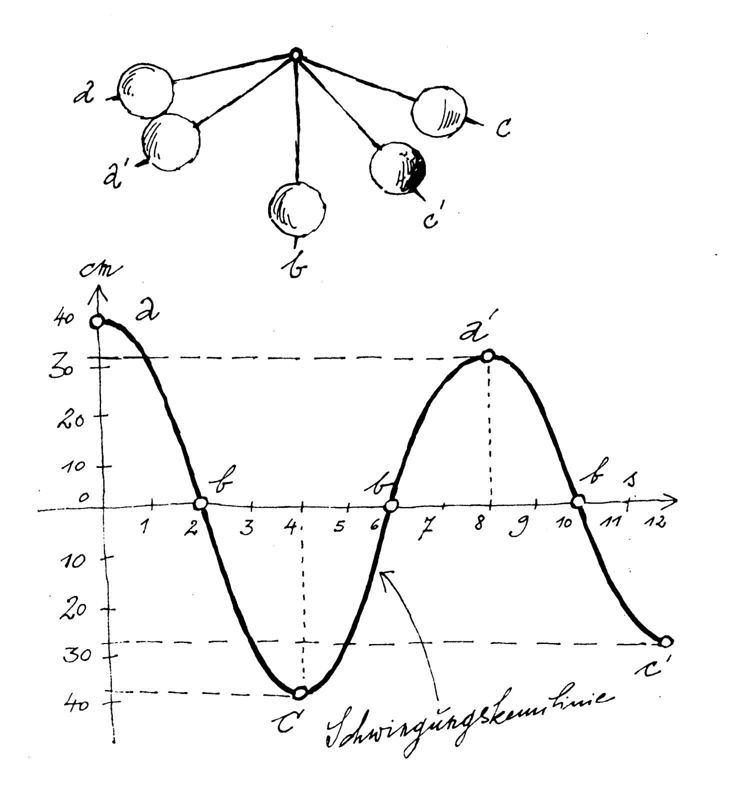
Wegen des ständigen Wechsels von potentieller Energie in kinetische und von kinetischer Energie in potentielle vollführt unser Pendel Schwingungen, die periodisch von einer Seite zur anderen (gemessen von der Null-Lage) erfolgen.

Diesen Vorgang wollen wir in einer *Kennlinie* festhalten.

Die Grundlage jeder Kennlinie bildet ein Koordinatensystem (Achsenkreuz). Auf der horizontalen Achse tragen wir in einem bestimmten Maßstab die Zeit ab. Wir unterteilen diese Achse so wie das Zifferblatt auf einer Stoppuhr. Auf der vertikalen Achse tragen wir, auch in einem bestimmten Maßstab, die Pendelschwingungen von der Null-Lage ab. Diese Achse wird in Längeneinheiten unterteilt (s. Bild S. 36).

Würde man jetzt in sehr kurzen Zeitabständen den Pendel-





ausschlag messen und das Ergebnis in Form eines Punktes in das Koordinatensystem einzeichnen, so erhielte man durch Verbinden eine Kurve, die verrät, wie sich das Pendel zu bestimmten Zeiten verhält. Aus der Grafik erkennen wir weiter, daß die Pendelschwingungen allmählich abklingen (gedämpft werden). Die *Schwingungsamplitude** wird kleiner und

Unter Amplitude versteht man den maximalen Wert einer beliebigen, wechselnden Größe. Bei Betrachtung der Pendelschwingungen stellen wir eine Geschwindigkeitsamplitude (wenn das Pendel durch den Punkt b geht), eine Schwingungsamplitude (zum Beispiel den Abstand zwischen Punkt a und b oder b und c) sowie die Amplituden der potentiellen und kinetischen Energie fest. Jede dieser veränderlichen Größen erreicht während einer Periode zweimal ihren Amplitudenwert.

kleiner, weil die Energie, die bei dem ersten Anstoß des Pendels in ihm gespeichert wurde, nach und nach für die Überwindung des Luftwiderstands, für die Reibung im Lager oder für die Längendehnung der Pendelschnur verbraucht wird. Je weniger Energieverluste entstehen, um so langsamer werden die Schwingungen gedämpft.

Die Zeit, in der das Pendel eine volle Schwingung ausführt, bezeichnet man als *Periode* und symbolisiert ihre Dauer mit dem Buchstaben T. Sobald wir die *Periodendauer* kennen, läßt sich die Schwingungsfrequenz schnell ausrechnen:

$$f = \frac{1}{T}\,; \quad T = \frac{1}{f}\,;$$

f in Hz, T in s.

Dauert die Periode zum Beispiel T= 8 s, dann beträgt die Schwingungsfrequenz 0,125 Hz. Bei einer Schwingungsfrequenz f =100 Hz dauert die Periode T= 0,01 s.

10. Elektromagnetische Schwingungen

Die elektromagnetischen Schwingungen sind wie alle anderen Schwingungen das Resultat des wechselnden Übergangs von Energie der einen Form in eine andere; in diesem Fall, der Übergang von elektrischer Feldenergie in magnetische Feldenergie und umgekehrt. Um die beiden Energiearten zu speichern, verwenden wir spezielle Bauelemente:

für die elektrische Feldenergie den Kondensator,

für die magnetische Feldenergie die Spule.

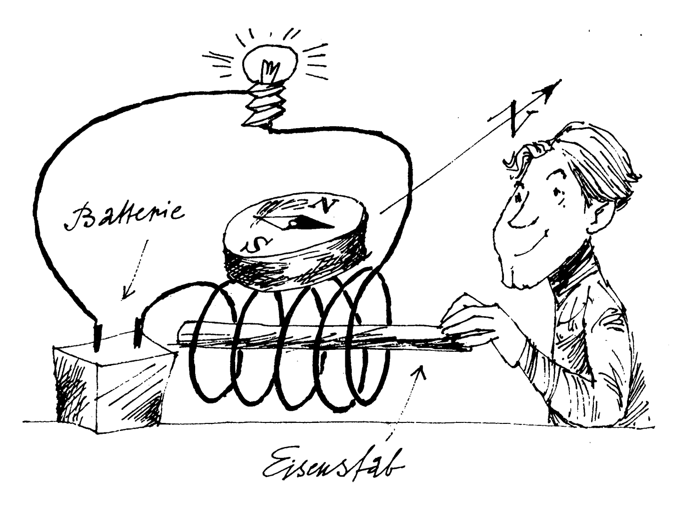
Den elektrischen Stromkreis, der aus einem Kondensator und einer Spule besteht, bezeichnet man als Schwingkreis.

Wir wissen bereits, daß sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein magnetisches Feld bildet. Ordnet man nun mehrere Leiter nebeneinander an, so wird das Magnetfeld stärker, da sich die Felder jedes einzelnen Leiters addieren.

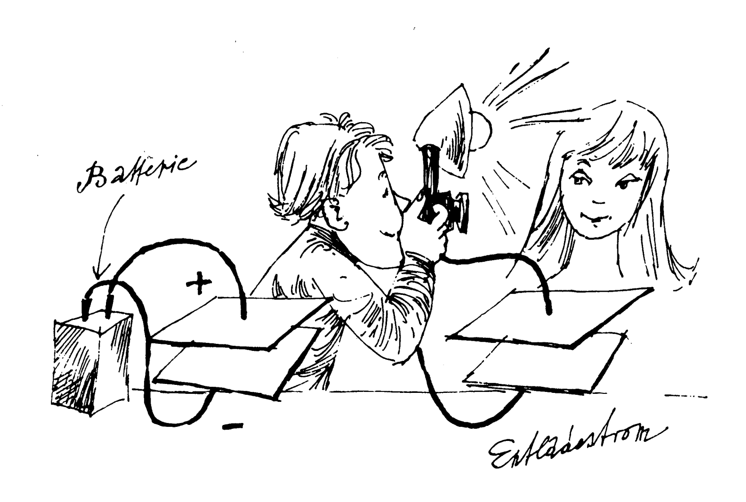
Es gibt auch einen anderen Weg, um ein stärkeres Magnetfeld zu erzeugen. Wir können unseren Leiter wie eine Spirale aufwickeln (d.h., aus ihm eine Spule wickeln). In diesem Fall addieren sich die Magnetfelder der einzelnen Drahtwindungen. Je dichter die Windungen nebeneinander liegen, um so stärker ist das resultierende Magnetfeld. Das stärkste Magnetfeld existiert im Spulenzentrum.

Die Ursache des Magnetfelds einer Spule ist die *Induktivität.* Die Induktivität wird durch den Buchstaben L symbolisiert (mit dem gleichen Buchstaben kennzeichnet man auch die Spulen in einer Schaltung). Die Einheit der Induktivität ist das Henry (H), eine sehr große, praktisch kaum verwendete Maßeinheit. In der Praxis benutzt man meist das Millihenry (mH), das ist ein tausendstel Henry, oder das Mikrohenry (μH), das ist ein millionstel Henry. In Schwingkreisen kommen

am häufigsten Spulen mit Induktivitäten von einigen Mikrohenry bis zu einigen Millihenry vor.
Man kann die Induktivität einer Spule um den 10- bis 100-fachen Wert steigern, wenn man sie auf einen Eisenstab wikkelt. Dieser Stab wird als Kern bezeichnet. Die Steigerung der Induktivität in diesem Fall erklärt sich daraus, daß der Kern die Kraftlinien des Magnetfelds konzentriert und die sonst *abgestreuten* Kraftlinien für die Induktivität sammelt. Außer Eisen gibt es noch verschiedene andere Werkstoffe, die ebenfalls das Magnetfeld einer Spule besonders intensiv verstärken. Diese Materialien werden unter dem Sammelbegriff *Ferromagnetika* (von dem lateinischen Wort *ferrum* = Eisen abgeleitet) zusammengefaßt.
Je größer der Ferromagnetstab ist, um so stärker wirkt sich das Magnetfeld der Spule aus, um so mehr nimmt die Induktivität der Spule zu.
Für die Erzeugung des Magnetfelds der Spule wird Energie der sich bewegenden Ladungsträger verbraucht.
Diese Energie muß von einer Spannungsquelle geliefert werden.



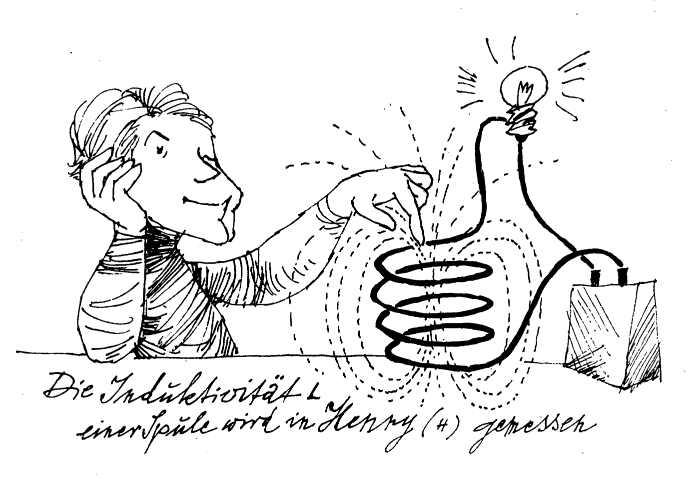
Wird diese abgeklemmt, so hört der Stromfluß in der Spule jedoch nicht augenblicklich auf. Das im Moment noch bestehende Magnetfeld gibt seine Energie an die Ladungsträger ab, die den Stromfluß noch kurze Zeit nach dem Abschalten in der Spule aufrechterhalten. Je größer die Induktivität der Spule ist, um so mehr Energie speichert sie im Magnetfeld, um so länger hält der Stromfluß nach dem Abschalten der Batterie an.
Je größer die Induktivität der Spule, desto größer auch die Stromstärke durch die Spule.
Und nun einige Worte zum Kondensator.
Den einfachsten *Kondensator* bilden zwei Metallplatten (Beläge) zwischen denen sich eine Isolierschicht (Luft, Papier, Glimmer, Keramik usw.) befindet. Schließt man den Kondensator an eine Spannungsquelle, z.B. an eine Batterie, so lädt er sich auf, d.h., der Minuspol der Spannungsquelle gibt an die mit ihm verbundene Platte Elektronen ab, während der Pluspol von der anderen Kondensatorplatte Elektronen absaugt: *Zwischen den Platten entsteht ein elektrisches Feld.*
Die elektrischen Ladungen auf den Platten, folglich auch das elektrische Feld des Kondensators, bleiben auch nach dem Abschalten der Batterie erhalten. Der Kondensator gibt die in ihm gespeicherte Energie nur dann ab, wenn wir ihn entladen, d.h., wenn wir beide Kondensatorplatten mit einem Leiter verbinden. In diesem Fall gelangen die von der Batterie auf den Platten angelagerten Ladungen von einer Platte auf die andere und neutralisieren sich auf diese Weise.
Über den Leiter, mit dem wir beide Platten verbinden, können die überschüssigen Elektronen von der negativen Platte auf die positive Platte übergehen und dort die freien Plätze ausfüllen.
Es wäre noch zu bemerken, daß es keine idealen Isolierstoffe gibt und jeder Isolator, wenn auch schlecht, elektrischen Strom leitet. Aus diesem Grund entlädt sich ein Kondensator auch mit der Zeit selbständig, ohne daß man beide Platten mit einem Draht (Leiter) verbindet. Die Ladungen fließen über



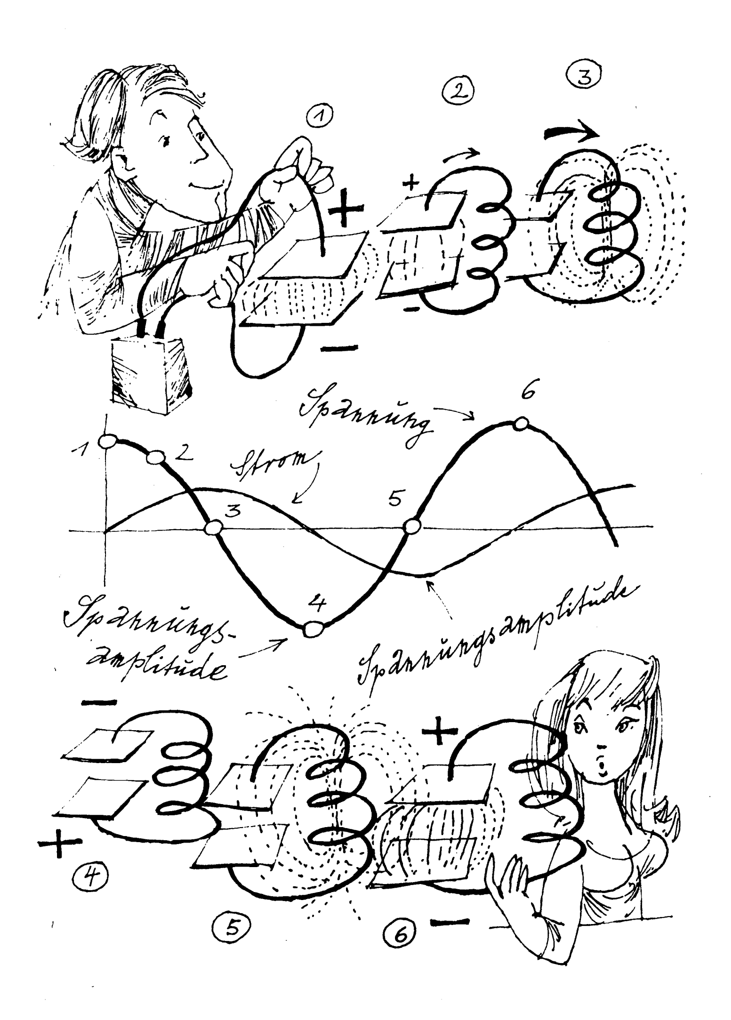
die Isolierschicht und die den Kondensator umgebende Luft von einer Platte zur anderen.
Die Eigenschaft eines Kondensators, Ladungen (und folglich Energie) in Form des elektrischen Feldes zu speichern, bezeichnet man als Kapazität. Die *Kapazität* eines Kondensators wird durch den Buchstaben C symbolisiert. Unter der gleichen Bezeichnung finden wir auch die Kondensatoren in elektrischen Schaltbildern. Die Einheit der Kapazität ist das Farad (F). Es gibt darüber hinaus auch kleinere Maßeinheiten. So zum Beispiel das Mikrofarad (μF) — ein millionstel Farad — und das Pikofarad (pF) — ein millionstel Mikrofarad. Ein Farad ist eine außergewöhnliche große Maßeinheit. Kondensatoren mit derartigen Kapazitäten kommen in der Praxis nicht vor. In Funkgeräten treffen wir gewöhnlich Kondensatoren von einigen Pikofarad bis zu einigen Mikrofarad, seltener solche mit Kapazitäten von 100 Mikrofarad.
Die Kapazität eines Kondensators hängt von der Plattengröße und dem Abstand der Platten voneinander ab. Je größer die Platten sind und je dichter sie angeordnet werden, um so größer ist die Kapazität C. Kondensatoren kleiner Kapazität haben



gewöhnlich rechteckige oder scheibenförmige Platten. Oftmals bestehen sie auch aus 2 ineinander geschobenen Röhrchen. Kondensatoren großer Kapazität haben „Platten“ in Form von langen Metallfolienbändern, die mit einer Isolierschicht zusammengerollt sind. Gewöhnlich bringt man sie anschließend in einem Keramik-, Metall- oder Plastgehäuse unter.

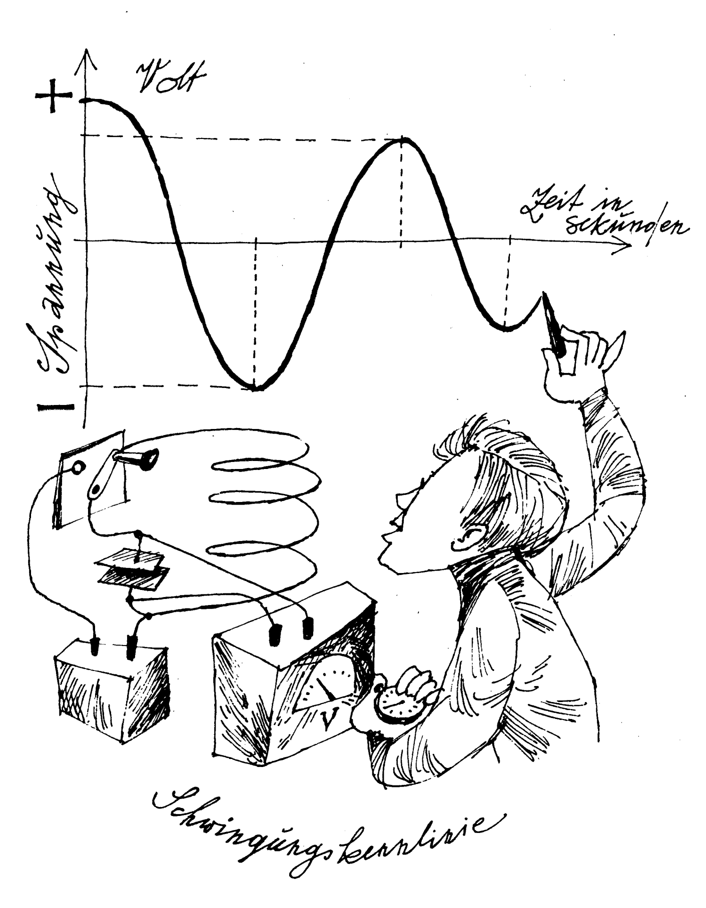


Die Kapazität eines Kondensators hängt stark ab von dem zwischen den Platten verwendeten Isolierstoff. Im Verhältnis zu Luft ergibt eine Papierisolation die 3- bis 4fache, Glimmer die 5- bis 8fache und einige Keramiksorten sogar eine 1000-fache Steigerung der Kondensatorkapazität.
Wir laden jetzt einen Kondensator von einer Batterie auf und schalten ihn dann an eine Spule. In dem von uns aufgebauten Schwingkreis entstehen sofort elektromagnetische Schwingungen. (s. Bild S. 44).
Der Entladestrom des Kondensators, der durch die Spule fließt, erzeugt um die Spule ein Magnetfeld, d.h., während der Entladung des Kondensators geht die Energie des elektrischen Feldes in magnetische Feldenergie der Spule über.
In dem Maße, wie sich der Kondensator entlädt, nimmt die Spannung an seinen Platten ab und der Strom im Schwingkreis zu. Zu dem Zeitpunkt, da der Kondensator völlig entladen ist, erreicht der Strom seinen *Maximalwert* (*Stromamplitude*). Doch selbst nach völliger Entladung des Kondensators hört der Stromfluß nicht sofort auf. Das abnehmende Magnetfeld der Spule unterstützt die Ladungsträgerbewegung, so daß sich erneut Ladungsträger auf den Kondensatorplatten ablagern. Dabei nimmt der Strom im Schwingkreis ab und die Spannung auf den Kondensatorplatten zu.
Dieser Prozeß — der umgekehrte Vorgang der Umwandlung von magnetischer Energie der Spule in Energie des elektrischen Feldes im Kondensator —, erinnert an den Übergang kinetischer Energie des Pendels in potentielle Energie.
Zu dem Zeitpunkt, da kein Strom mehr im Schwingkreis fließt und das Magnetfeld der Spule nicht mehr besteht, zeigt sich, daß der Kondensator bis zur maximalen Spannung (Amplitudenwert) mit umgekehrtem Vorzeichen aufgeladen ist.
Das bedeutet: Auf der ehemals positiven Kondensatorplatte herrscht jetzt Elektronenüberschuß, auf der ehemals negativen Platte umgekehrt Elektronenmangel. Aus diesem Grund fließt, wenn sich der Kondensator erneut entlädt (und das geschieht

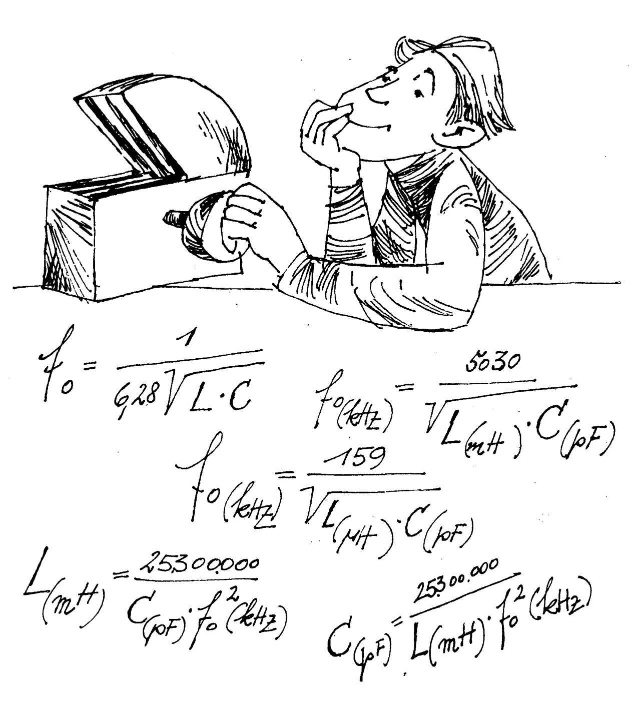


unmittelbar danach, sobald er vollständig aufgeladen ist), der Strom im Schwingkreis entgegengesetzt.
Der periodisch wiederkehrende Energieaustausch zwischen dem Kondensator und der Spule stellt nichts anderes dar als elektromagnetische Schwingungen im Schwingkreis. Im Ver-

lauf dieser Schwingungen fließt im Schwingkreis Wechselstrom, auf den Kondensator wirkt eine Wechselspannung. Aus den beobachteten Strom- und Spannungsänderungen können wir uns eine Kennlinie für die elektromagnetischen Schwingungen im Schwingkreis aufzeichnen. Wir tragen in dem Koordinatensystem die positiven Strom- oder Spannungswerte oberhalb der Abszisse und die negativen unterhalb der



Abszisse auf. Die Halbperiode, in der der Strom in positiver Richtung fließt, bezeichnet man auch oftmals als *positive Stromhalbwelle*, die andere Halbwelle dagegen als *negative Stromhalbwelle.* Man kann auch von der *positiven und der negativen Spannungshalbwelle* sprechen:
Die elektromagnetischen Schwingungen, mit denen wir uns beschäftigt haben, bezeichnet man als freie oder Eigenschwingungen. Sie entstehen immer dann, wenn wir unserem Schwingkreis eine bestimmte Energie zuführen, die Energiezuführung unterbrechen und ihm anschließend die Möglichkeit geben, diese Energie zwischen dem Kondensator und der Spule auszutauschen. Die Frequenz der freien Schwingungen hängt davon ab, wie schnell Kondensator und Spule Energie speichern und



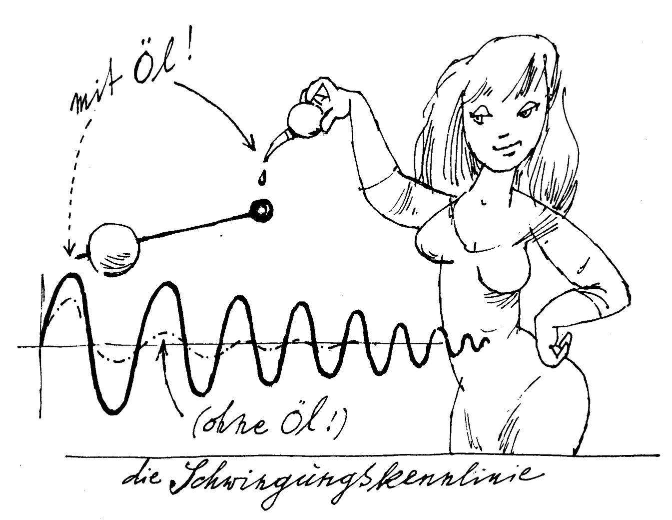
sie wieder abgeben. Das wird bestimmt durch die Induktivität der Spule und durch die Kapazität des Kondensators (ähnlich wie die Schwingfrequenz der Gitarrensaite abhängt von der Masse der Saite und ihrer Elastizität).
Je größer die Induktivität der Spule, um so mehr Zeit vergeht, bevor sich das Magnetfeld aufgebaut hat, um so länger unterstützt dieses Magnetfeld den Stromfluß im Schwingkreis.
Das gleiche trifft zu für die Kapazität des Kondensators. Je größer sie ist, um so länger entlädt sich der Kondensator, um so langsamer wechseln die Ladungen auf den Platten. Wir merken uns: *Je größer L und C in einem Schwingkreis sind, um so langsamer verlaufen die elektromagnetischen Schwingungen und um so niedriger ist ihre Frequenz.*
Die Abhängigkeit der Frequenz f_0 der freien Schwingung von der Spule und dem Kondensator im Schwingkreis drückt eine einfache Formel aus. Sie ist eine der wesentlichsten Formeln in der Funktechnik überhaupt

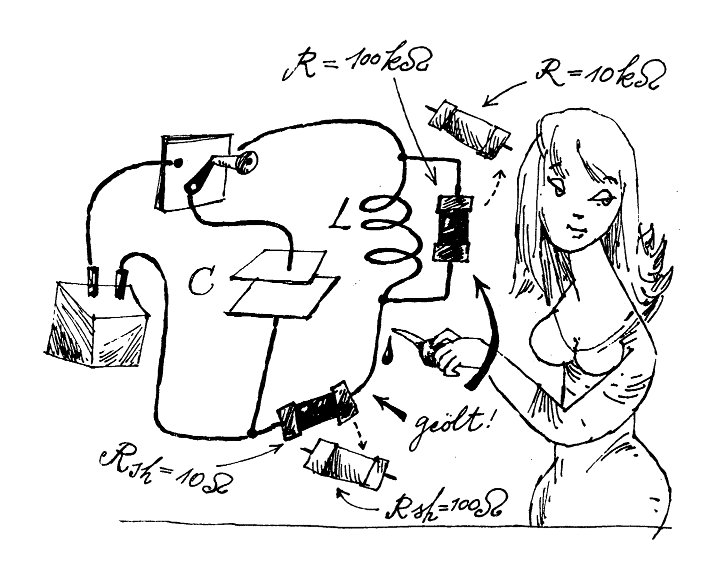
$$f = \frac{1}{6{,}28 \sqrt{L \cdot C}};$$

f in Hz, L in H, C in F.
Analoge Formeln, die jedoch bequemer für praktische Rechnungen sind, enthält das Bild auf S. 46.

11. Dämpfung und Verluste im Schwingkreis

Mit der Zeit nehmen die Spannungs- und die Stromamplituden im Schwingkreis ab. Die elektromagnetischen Schwingungen werden wie Pendelschwingungen oder wie die Schwingungen unserer Gitarrensaite gedämpft.
Die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen im Schwingkreis ist damit verbunden, daß bei jedem Umwandeln der Energie aus dem Kondensator in die Spule und umgekehrt etwas Energie verlorengeht. Die wesentlichsten Verluste im Schwingkreis entstehen im Spulendraht, in den Verbindungsleitungen und im *Dielektrikum* (in der *Isolierschicht*) des Kondensators sowie im Spulenkörper und durch die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen. Wollten wir also jetzt ein reales Schaltbild unseres Schwingkreises zeichnen, so müßten wir





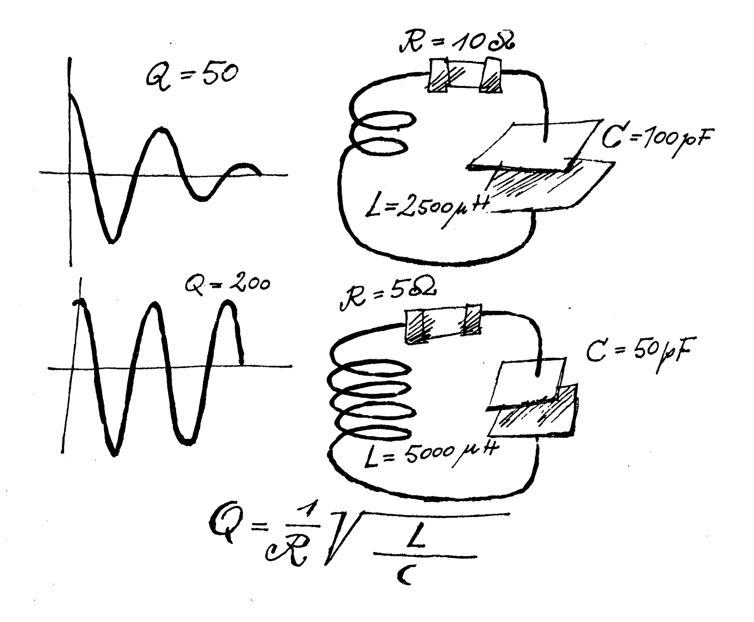
neben der Schwingkreisspule L und dem Schwingkreiskondensator C einen Widerstand einzeichnen, der die Energieverluste symbolisiert.

Die wesentlichsten Energieverluste — die Spulenverluste, die Verluste durch Abstrahlung und andere — werden durch einen Widerstand R symbolisiert, der in Reihe zu L und C geschaltet ist. Während der Schwingungen fließt durch diesen Widerstand der gesamte Schwingkreisstrom. Je größer der Widerstand R ist, um so mehr Energie wird an ihm verbraucht.

Die Berechnung einiger Verlustarten (Kondensatorverluste, Verluste im Spulenkörper und andere) nimmt man manchmal auch so vor, als ob sich im Schwingkreis noch ein parallel zum Kondensator oder zur Spule geschalteter Widerstand (ein Shuntwiderstand*) befände. Während der Entladung des

* Das Wort *shunt* heißt nichts anderes als Umgehungsweg. Als Shuntwiderstand bezeichnet man Widerstände, die parallel zu irgendeinem Bauelement geschaltet sind und eine Stromverzweigung hervorrufen. Je kleiner der Shuntwiderstand, desto größer der Strom, der durch ihn fließt, und um so wirkungsvoller „shuntet" er auf diese Weise das Bauelement.

Kondensators entsteht auf diese Weise eine Stromverzweigung: ein Teil des Stromes fließt durch die Spule und erzeugt in ihr eine Energiereserve in Form des Magnetfelds.
Der andere Teil des Entladestroms fließt durch unseren Shuntwiderstand R_{sh}. An ihm entstehen Energieverluste. Je kleiner R_{sh}, um so größer der durch ihn fließende Teilstrom; um so mehr Energie geht an diesem Widerstand verloren.
Wollen wir also die Verluste im Schwingkreis kleinhalten, so müssen wir danach streben, R so klein wie möglich, R_{sh} aber so groß wie möglich zu gestalten. Die Widerstände R und R_{sh} sind in den Schaltungen funktechnischer Geräte nicht eingezeichnet, da sie keine selbständigen Bauelemente darstellen. Die Widerstände sind real vorhanden, sie verbrauchen Energie und dämpfen die Schwingungen.
Um die *Schwingungsdämpfung in einem Schwingkreis* zu veranschaulichen, gibt es eine spezielle Größe, die man als *Güte* bezeichnet. Die Güte, ausgedrückt durch den Buchstaben Q, ist eine Verhältniszahl, die angibt, um wievielmal die im Kondensator oder in der Spule gespeicherte Energie größer ist als die Energie, die an den Widerständen R und R_{sh} verbraucht wird. Wir erkennen eindeutig, daß bei größerem Q die Schwingungen in unserem Schwingkreis länger andauern. Sie werden also langsamer gedämpft. Die Güte realer Schwingkreise beträgt gewöhnlich 30 bis 300. Die Güte spezieller Schwingungssysteme (Quarzplättchen, Hohlraumresonatoren) erreicht Werte von einigen zehntausend bis hunderttausend.
Verschlechtern (das ist manchmal tatsächlich erforderlich!) kann man die Güte eines Schwingkreises sehr einfach: wir schalten gewöhnliche Widerstände in den Schwingkreis. Was aber eine Gütesteigerung anbetrifft (wir brauchen in der Regel Schwingkreise hoher Güte), so ist das meist sehr schwierig zu lösen. Die Aufgabe besteht hauptsächlich darin, die Verluste in der Schwingkreisspule herabzusetzen.
Die Induktivität von Schwingkreisspulen für den Lang- und Mittelwellenbereich beträgt 100 bzw. 1000 μH. Die Spulen



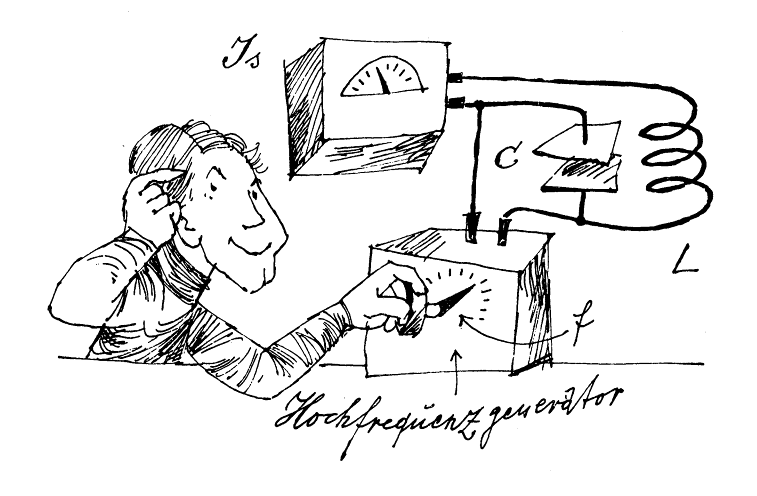
bestehen gewöhnlich aus einigen zehn oder hundert Windungen dünnen Kupferdrahts (Durchmesser 0,1 bis 0,2 mm).
Eine einfache, zugleich aber sehr wirkungsvolle Maßnahme, um die Verluste in Lang- und Mittelwellenspulen herabzusetzen, ist der Einsatz von Ferritkernen. Wir hatten bereits gesehen, daß ein Ferritkern die Induktivität einer Spule sehr stark vergrößert. Aus diesem Grund weisen 2 Spulen mit der gleichen Induktivität — wobei eine davon einen Ferritkern enthält, die andere aber nicht — unterschiedliche Windungszahlen auf. Die Spule mit dem Ferritkern hat weniger Windungen und daher auch einen kleineren Widerstand (der Leiterwiderstand R hängt von der Länge des Leiters ab — je länger der Leiter, desto größer der Widerstand R).
Für Spulen, durch die Wechselstrom fließt, ist ein Kern aus einem einzigen Stück (Vollmaterial) ungeeignet, da das wechselnde Magnetfeld der Spule in dem Kern einen Strom indu-

ziert und dafür ein großer Teil der gespeicherten Energie verbraucht wird. Auf diese Weise würde der Spulenkern, mit dem wir die Induktivität unserer Spule erhöhen wollten, selbst zu einer Verlustquelle. Diese Verluste steigen mit zunehmender Stromfrequenz im Schwingkreis an.
Um derartige Verluste (man bezeichnet sie auch als Eisenverluste) bei *Niederfrequenzspulen* — *NF-Spulen* — geringzuhalten, besteht der Spulenkern aus voneinander isolierten Blechen. Der Strom, der in jeder einzelnen Blechplatte induziert wird, erzeugt sein eigenes Magnetfeld, das die Ströme in den benachbarten Platten schwächt. Auf diese Weise entstehen in den einzelnen Platten lediglich geringe Ströme, die unserer Spule nur wenig Energie entziehen. Je dünner die Bleche, aus denen der Spulenkern besteht, um so kleiner die Eisenverluste.
In *Hochfrequenzspulen* — *HF-Spulen* — erweist sich die Methode, die Kerne aus dünnen Blechen zusammenzusetzen, als unbrauchbar. Aus diesem Grund preßt man HF-Spulenkerne aus ferromagnetischem Pulver, das mit Bindemitteln (wie Bakelitlack, Polystyrol u.ä.) gemischt wird. Die Bindemittel hüllen die einzelnen Pulverkörnchen ein und isolieren sie auf diese Weise voneinander. Die je nach den Erfordernissen gepreßten ferromagnetischen Teile leiten elektrischen Strom sehr schlecht. HF-Spulenkerne werden gewöhnlich aus folgenden magnetdielektrischen Materialien hergestellt: Magnetit, Alsifer, Karbonyleisen und Ferriten. Am häufigsten verwendet man heute Ferrite. Sie steigern die Spuleninduktivität weitaus besser als andere Magnetdielektrika. Meist werden die Spulenkerne in Form von Stäben mit einem Gewinde gepreßt, damit man die Kerne in den Spulenkörper schrauben kann. Es gibt aber auch sogenannte *Topfkerne*, die die Spule aufnehmen.
Der Einsatz von Spulenkernen aus Magnetdielektrika gestattet es, den Widerstand R bedeutend herabzusetzen und die Güte Q zu steigern. Andere Wege, um die Verluste zu mindern, bestehen darin, Keramik-, Glimmer- und Luftkondensatoren

als Schwingkreiskondensatoren zu benutzen, die Montage von HF-Stromkreisen mit möglichst kurzen Leitungen auszuführen und Spulenkörper mit kleinen Verlustwerten zu verwenden.
Der junge Funker hat nicht immer die Möglichkeit, und in vielen Fällen ist es auch nicht sinnvoll, alle Maßnahmen einzuleiten, um die Verluste maximal herabzusetzen. Oftmals müssen wir uns mit einer stark verminderten Schwingkreisgüte zufriedengeben.
Abschließend sei bemerkt, daß die Schwingkreisgüte Q nicht nur von den Verlusten im Schwingkreis, sondern auch von dem Verhältnis zwischen L und C abhängt. Je größer L und je kleiner C, um so größer die Güte Q. Mit diesem Verhältnis werden wir uns später noch einmal befassen.

12. Resonanz

Beginnen wir damit, unser Pendel im Takt seiner Eigenfrequenz zu bewegen. Das Pendel schwingt nach rechts, wir stoßen es etwas an. Jetzt schwingt das Pendel nach links. Auch hierbei helfen wir wieder etwas nach. Sobald wir das Pendel mit der Frequenz anstoßen, mit der es selbst schwingt, werden die Schwingungen nicht gedämpft, sondern im Gegenteil: sie steigern sich. Das zu erklären ist nicht schwer, denn die Anstöße, die unser Pendel erhält, kompensieren völlig die Energieverluste, die die Ursache für die Schwingungsdämpfung sind. Mehr noch, die Anstöße, die wir dem Pendel geben, helfen ihm, den Luftwiderstand und die Reibung in den Lagern zu überwinden und auf diese Weise die Schwingungsamplitude zu vergrößern. Je geringer die allgemeinen Energieverluste sind, um so größer werden die Schwingungsamplituden bei gleichbleibend starken Anstößen.
Das gleiche können wir auch an unserem Schwingkreis beobachten, wenn wir mit Hilfe eines speziellen Generators im Schwingkreis einen Wechselstrom fließen lassen, dessen Frequenz mit der Eigenfrequenz der elektromagnetischen Schwingungen übereinstimmt. In diesem Fall — man bezeichnet ihn übrigens mit *Resonanz* — gibt es im Schwingkreis eine Reihe interessanter Erscheinungen, die in der Funktechnik weitgehend ausgenutzt werden.
Der vom Generator ankommende Strom, der im „Gleichschritt" mit den Eigenschwingungen wirkt, stößt sozusagen die sich bewegenden Ladungen an und hilft ihnen, den Verlustwiderstand zu überwinden. Mehr noch, dank der Hilfe des Generators kann die Stromamplitude bei Resonanz im Schwingkreis stark ansteigen. Allerdings wachsen bei einem höheren

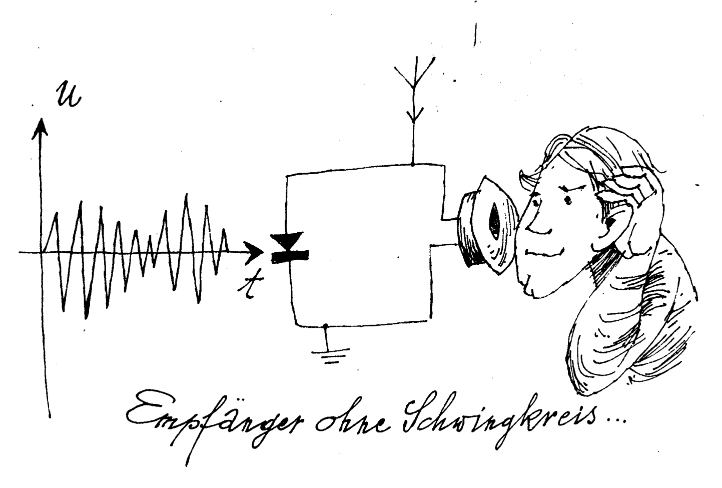


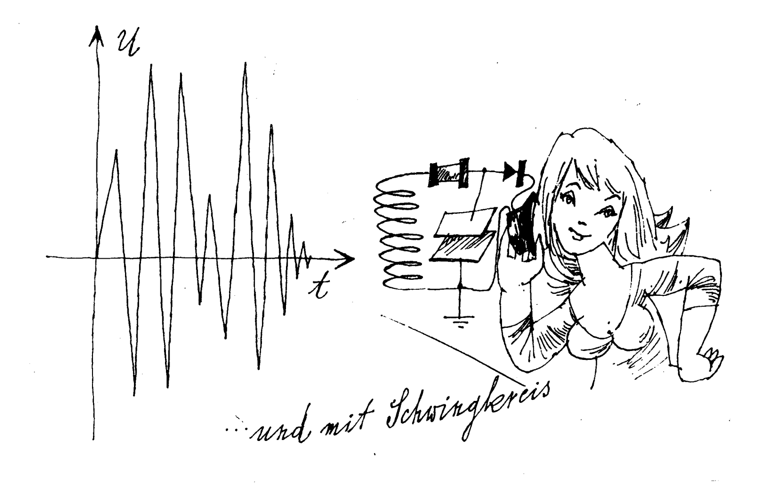
Strom auch die Energieverluste: der Schwingkreisstrom fließt durch den Widerstand R. Je größer der Strom ist, um so mehr Energie geht am Widerstand R verloren. Aus diesem Grund stellt sich im Resonanzfall ein solcher Schwingkreisstrom ein, bei dem die Energie, die der Generator liefert, die Verluste im Schwingkreis kompensieren kann. Wir erkennen, je geringer die Verluste sind — d.h., je größer Q —, desto stärker wird der Schwingkreisstrom bei der gleichen Energiemenge, die der Generator liefert. Sobald wir den Generatorstrom erhöhen, steigt auch der Schwingkreisstrom.
Bei Resonanz ist die elektromagnetische Energie, die Kondensator und Spule austauschen, um Q mal größer als die Energie, die der Generator erzeugt. Vergleichen wir das eben Gesagte mit der potentiellen und der kinetischen Energie, die ein schwingendes Pendel enthält. Beide Energiearten können wesentlich größer werden, als unser Anstoß selbst ausmacht, der es dem Pendel ermöglicht, die Reibung zu überwinden. Durch verschiedene Methoden, nach denen der Schwingkreis an den Generator angeschaltet wird, läßt sich erreichen, daß im Resonanzfall der Strom im Schwingkreis bedeutend grö-

ßer — genauer um Qmal größer — ist als der vom Generator eingespeiste. Das gleiche gilt für die Spannung. Dabei übersteigt die Spannung am Kondensator oder an der Spule die Generatorspannung um den Qfachen Wert. Diese Eigenschaft des Schwingkreises können wir im Empfänger dazu ausnutzen, um die Spannung, die an den Detektor gelangt, zu erhöhen und somit die Lautstärke der Rundfunkübertragung zu steigern.

Im Empfänger erfüllt die *Antenne* die Aufgabe des „Anstoßers" für die Eigenschwingungen des Schwingkreises. In ihr induzieren die elektromagnetischen Schwingungen einen hochfrequenten Strom. Um Resonanzbedingungen zu schaffen, wählen wir die Kapazität und die Induktivität des Schwingkreises so, daß die Eigenfrequenz der Schwingungen gleich der Frequenz der zu empfangenden Rundfunkstation ist.

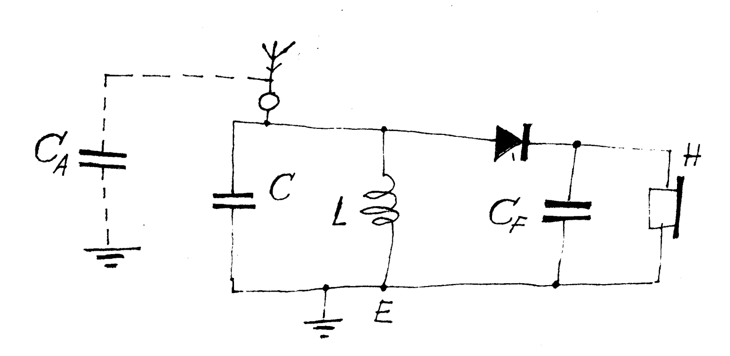
Auf den nachfolgenden Seiten sind einige Schaltungen für Detektorempfänger mit Schwingkreisen dargestellt. In allen diesen Empfängern wird der Detektor, der mit den Kopfhörern in Reihe geschaltet ist, an den Schwingkreis LC angeschlossen. Die modulierte Hochfrequenzspannung, die im Schwingkreis wirkt, erzeugt im Detektor-Kopfhörerstrom-





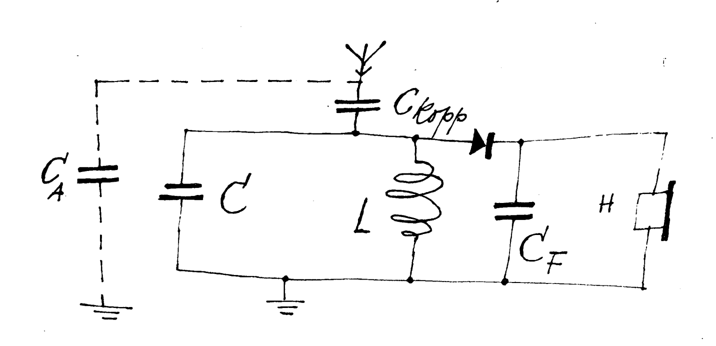
kreis einen pulsierenden Strom. Dieser Strom zwingt die Kopfhörermembranen H, mit der Tonfrequenz zu schwingen. In allen Schaltungen ist der Kondensator C_F ein Siebkondensator, der die Wirkungsweise des Detektors verbessert. Wir werden uns etwas später noch näher mit der Funktion dieses Kondensators beschäftigen.

In diesem Empfänger fließt das empfangene Signal direkt aus der Antenne auf den Schwingkreis (direkte Kopplung Antenne-



Schwingkreis). Dabei ist die Eigenkapazität der Antenne C_A * parallel zum Schwingkreiskondensator C geschaltet und die Gesamtkapazität daher gleich der Summe von C_A und C. (Die parallele Verbindung von 2 Kondensatoren ist einem Kondensator mit einer entsprechend großen Plattenfläche äquivalent; die Gesamtkapazität von 2 parallelgeschalteten Kondensatoren entspricht der Summe der einzelnen Kapazitäten.) Nachteilig wirkt sich bei der direkten Ankopplung der starke Einfluß der Antenne auf die Abstimmung des Schwingkreises aus. Wechselt man die Antenne, so kann sich C_A verändern und folglich auch die Gesamtkapazität des Schwingkreises. Das zerstört aber die Resonanzbedingungen und setzt die Lautstärke herab.

Wir können den Einfluß der Antenne herabsetzen, wenn wir sie über einen Kopplungskondensator C_{kopp} mit einer Kapazität von gewöhnlich 15 bis 20 pF (kapazitive Ankopplung der Antenne) an den Schwingkreis anschließen. In diesem Fall ist ein Stromkreis parallel zu C_A geschaltet, der aus den in Reihe geschalteten Kapazitäten C_A und C_{kopp} besteht. Bei einer Reihenschaltung von 2 Kondensatoren, die sich wert-



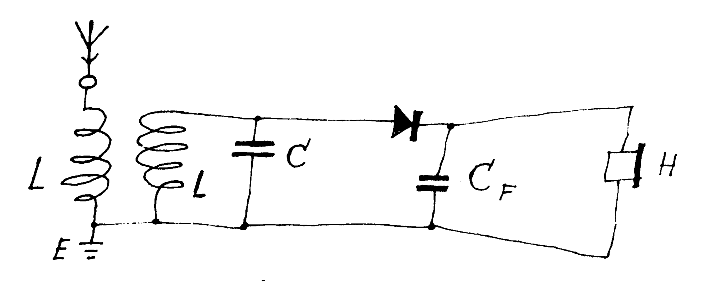
* Im gegebenen Fall ist CA die Kapazität eines Kondensators, dessen eine Platte aus der Antenne, dessen andere Platte aus der Erde besteht. Kleine Zimmerantennen haben einen CA-Wert von 30 bis 80 pF, Außenantennen dagegen 300 bis 400 pF. Bei der Berechnung und Abstimmung des Empfängers wurde angenommen, daß $C_A = 200$ pF beträgt.

mäßig sehr stark unterscheiden, ist die Gesamtkapazität etwa gleich der kleinsten Kapazität (ein wenig kleiner als sie).
Schalten wir unter diesen Umständen an den Schwingkreis verschiedene Antennen mit unterschiedlichen Eigenkapazitäten, so bleibt die Gesamtkapazität des Stromkreises $C_{kopp}C_A$ in jedem Fall etwa gleich 15 bis 20 pF. Die Resonanzbedingung wird nicht gestört.
Je kleiner die Koppelkapazität C_{kopp} ist, um so weniger beeinflußt die Antenne den Schwingkreis. Wir können aber die Koppelkapazität nicht unendlich klein wählen, da sich damit auch die Signalspannung, die auf den Schwingkreis wirkt, vermindert. Um das näher zu erklären, betrachten wir, wie sich ein Kondensator im Wechselstromkreis verhält.
Man kann streng genommen sagen, daß durch einen Kondensator weder Gleichstrom noch Wechselstrom fließt, da sich zwischen den Kondensatorplatten ein Isolator befindet, in dem sich keine freien elektrischen Ladungen bewegen können. Ein Kondensator in einem Gleichstromkreis ist gleichbedeutend mit der Unterbrechung dieses Stromkreises. Bei Anschluß an Wechselspannung entsteht aber ein Wechselstrom, denn der Kondensator wird periodisch geladen und entladen. Wir können also sagen, daß der Kondensator Wechselstrom „durchläßt", obwohl die Ladungen nicht durch den Isolator fließen. Der Kondensator beeinflußt den Wechselstromwert im Stromkreis, so daß man ihn als Widerstand betrachten kann. Dieser sogenannte kapazitive Widerstand wird in Ohm (Ω) gemessen und durch den Buchstaben X_C symbolisiert. Der *kapazitive Widerstand* X_C ist von der Wechselstromfrequenz und von der Kapazität C des Kondensators abhängig.

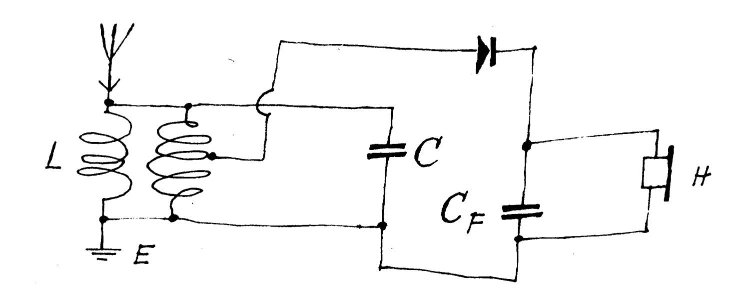
$$X_C = \frac{1}{6{,}28\, f \cdot C};$$

X_C in Ω, f in Hz, C in F.
Je kleiner die Kapazität C ist, desto weniger Elektronen erreichen die Kondensatorplatten während jeder Ladung und Entladung. Je kleiner die Frequenz f ist, desto seltener wird

der Kondensator geladen und entladen. Hieraus folgt, daß durch eine verminderte Frequenz f und eine kleinere Kapazität C auch der Strom im Stromkreis abnimmt oder, mit anderen Worten, der Kondensatorwiderstand zunimmt. Jetzt wird klar, warum eine kleinere Koppelkapazität C_{kopp} den Kondensatorwiderstand erhöht und daher auch den Antennenstrom herabsetzt.
Das Bild unten zeigt eine induktive Ankopplung des Schwingkreises an die Antenne. Der Hochfrequenzstrom, der in die Antenne induziert wird, fließt durch die Koppelspule L_{kopp}. Das Magnetfeld dieser Spule induziert in die Schwingkreisspule L einen Strom (beide Spulen werden nebeneinander angeordnet), so daß die Hochfrequenzenergie aus dem Antennenkreis in den Schwingkreis übertragen wird.
Durch Verändern des Abstands zwischen den Spulen L und L_{kopp} kann man die Kopplung zwischen dem Schwingkreis und der Antenne loser oder fester gestalten. Gewöhnlich ist die Induktivität der Koppelspulen im Empfänger 4- bis 5mal größer als die Induktivität der Schwingkreisspule (man kann diese Spulen sehr leicht an ihrem Äußeren erkennen). Bei einem Detektorempfänger empfiehlt es sich, die zweckmäßigste Koppelspule L_{kopp} durch Probieren zu finden.
Diese Schaltung unterscheidet sich von der Schaltung auf S. 61 dadurch, daß der Detektor unmittelbar an die Anzapfung der Schwingkreisspule L geschaltet ist. Auf diese Weise wird dem Detektor nur ein Teil der am Schwingkreis wirkenden Span-



nung zugeführt. In vielen Fällen müssen wir diesen Nachteil jedoch in Kauf nehmen, da das Anschalten des Detektors in dieser Weise zu einer höheren Schwingkreisgüte führt. Den Detektor-Kopfhörerstromkreis können wir als einen Widerstand betrachten, der den Schwingkreis shuntet. Schließt man diesen Stromkreis nur an einen Schwingkreisabschnitt an, so nimmt der Strom, der durch den gesamten Stromkreis fließt, ab. Die Energieverluste im Schwingkreis werden kleiner, d.h., die Schwingkreisgüte nimmt zu. Je weiter unten (im Bild) wir den Detektor anschließen, um so geringer ist die Spannung, die an ihm wirkt; gleichzeitig steigt die Schwingkreisgüte.
Wir können den Detektoranschluß an die Schwingkreisspule L so wählen, daß der Strom im Detektor-Kopfhörerstromkreis nur unbedeutend abfällt, die Schwingkreisgüte Q aber gleichzeitig um das 1,5- bis 2fache ansteigt. *Je höher die Schwingkreisgüte, desto besser die Trennschärfe unseres Schwingkreises.*



13. Der Schwingkreis wählt den Sender aus

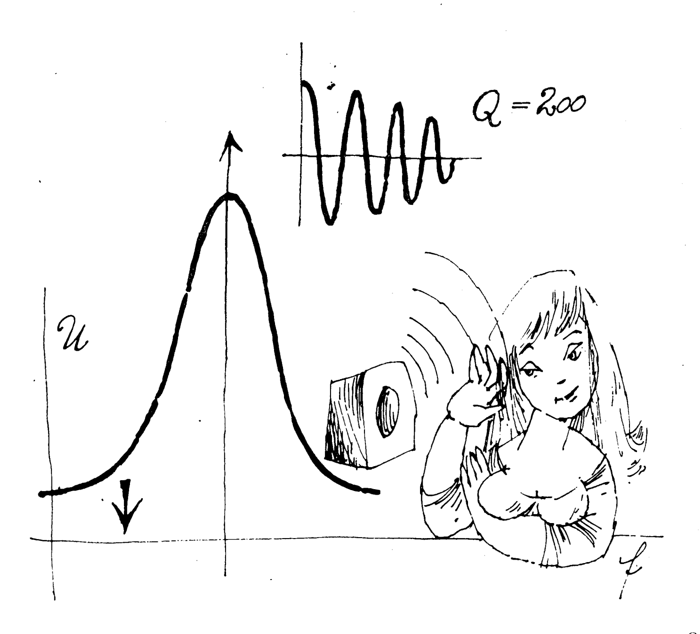
Verändert man die Frequenz des Wechselstroms, der vom Hochfrequenzgenerator in den Schwingkreis eingekoppelt wird, dann verändert sich auch die Stromamplitude im Schwingkreis. Die bei verschiedenen Frequenzen gemessenen Stromwerte im Schwingkreis ergeben eine Kennlinie, die die Abhängigkeit des Stromes von der Frequenz darstellt. Man nennt diese Kennlinie die *Resonanzkurve des Schwingkreises.* Den größten Schwingkreisstrom können wir im Resonanzfall beobachten, wenn die Generatorfrequenz mit der Eigenfrequenz f_0 des Schwingkreises (meist als Resonanzfrequenz bezeichnet) übereinstimmt ($f_{res} = f_0$).
Je weiter die Generatorfrequenz von der Eigenfrequenz des Schwingkreises abweicht, um so kleiner wird der Schwingkreisstrom. Schließen wir nun an den Schwingkreis die Antenne an, und bringen wir durch Abstimmen von L und C den Schwingkreis mit einer zu empfangenden Rundfunkstation in Resonanz (d.h., die Eigenfrequenz des Schwingkreises wird solange verändert, bis sie mit der Frequenz der Rundfunkstation übereinstimmt), dann werden die Signale benachbarter Rundfunkstationen durch den Schwingkreis geschwächt. Wir können von der Resonanzkurve ablesen, daß die Signale benachbarter Rundfunkstationen, d.h. von Sendern, deren Frequenz $\pm$ 10 kHz von der zu empfangenden Station abweicht, am wenigsten geschwächt werden. Die Zahl, die uns angibt, um wievielmal der Schwingkreisstrom der Frequenz der zu empfangenden Rundfunkstation größer ist als der benachbarte Sender (Gleichheit des induzierten Stromes beider Stationen in der Antenne vorausgesetzt) heißt *Trennschärfe.* Die Trennschärfe eines Schwingkreises können wir nach der Form

ihrer Resonanzkurve beurteilen. *Je schmaler und spitzer sie ist und je steilere Flanken sie aufweist, um so stärker wird das Signal benachbarter Stationen unterdrückt, desto bessere Trennschärfe hat unser Empfänger.*

Die Form der Resonanzkurve wird wesentlich von der Schwingkreisgüte Q bestimmt. Je größer Q, um so schmaler die Resonanzkurve. Eine größere Schwingkreisgüte führt also, wie wir sehen, nicht nur zu einer höheren Empfängerempfindlichkeit, sondern auch zu einer besseren Trennschärfe.

Empfänger, besonders solche, die für den Ortsempfang ausgelegt sind, haben mehrere Schwingkreise, wobei jeder einzelne auf einen bestimmten Sender abgestimmt ist. Der jeweilige Schwingkreis wird mit einem Schalter eingeschaltet. Man bezeichnet dieses System als *Festfrequenzabstimmung*.

Bei einer durchstimmbaren Empfängerabstimmung verwenden wir als Schwingkreiskondensator C einen *Drehkondensator*.

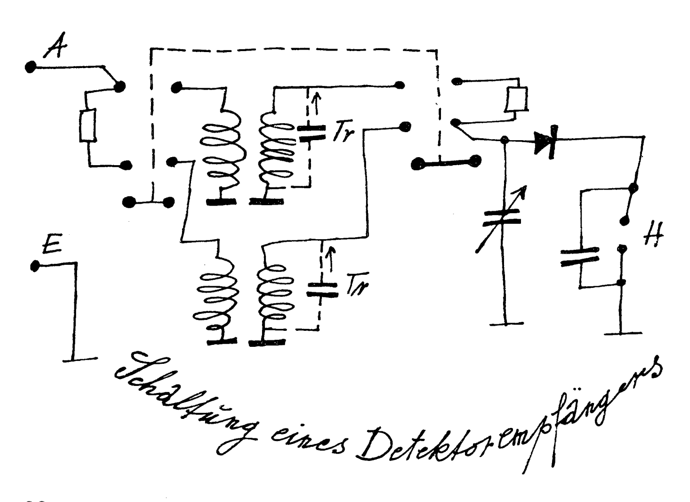


Dieser Kondensator besteht aus 2 Teilen, dem unbeweglichen *Stator* und dem beweglichen *Rotor*. Sowohl der Stator als auch der Rotor bestehen aus Metallplatten. Der Rotor ist mit dem Metallgehäuse des Kondensators verbunden, der Stator vom Rotor isoliert angeordnet. Bei der Montage wird der Rotor gewöhnlich mit dem unteren Spulenanschluß verbunden, d.h., wir erden ihn. Sobald man den Rotor dreht, werden die Rotorplatten zwischen die Statorplatten geschoben. Damit verbunden ist gleichzeitig eine Änderung der Kapazität des Drehkondensators. Wesentliche Merkmale von Drehkondensatoren sind die maximale Kapazität C_{max} (die Rotorplatten tauchen völlig in die Statorplatten ein) und die minimale Kapazität C_{min} (die Rotorplatten sind völlig aus dem Stator herausgedreht).
Sehr oft treffen wir auch auf Kondensatoren, die aus 2 Drehkondensatoren zusammengesetzt sind. Jede Sektion weist eine maximale Kapazität von $C_{max}=500$ pF und eine minimale Kapazität von 15 bis 25 pF auf. Eine gemeinsame Achse verbindet die Rotoren beider Drehkondensatoren miteinander. Bei einem Detektorempfänger zum Beispiel werden wir aber nur eine Sektion ausnutzen und den Stator der anderen Sektion frei lassen.
Mit einer Sektion des Drehkondensatorblocks kann man die Schwingkreisfrequenz 3- bis 4mal kontinuierlich durchstimmen und auf diese Weise einen beliebigen Rundfunkbereich völlig bestreichen. Die maximale Kapazität des Drehkondensators entspricht dabei der niedrigsten Bereichsfrequenz, die minimale Kapazität der höchsten Bereichsfrequenz. Der Übergang von einem Wellenbereich auf einen anderen erfolgt durch Umschalten der Schwingkreisspulen. Beispielsweise wird beim Übergang vom Langwellenbereich auf den Mittelwellenbereich die Schwingkreisinduktivität L um das 10fache verringert. Der Abstimmkondensator bleibt jedoch in allen Wellenbereichen der gleiche. Die einzelnen Spulen für die entsprechenden Wellenbereiche sind über einen Schalter mit dem Kondensator verbunden.

Für eine genaue Bereichseinstellung des Empfängers beim Zusammenbau schalten wir zusätzlich Nachstimmelemente in den Schwingkreis ein. Eines dieser Bauelemente ist der *Nachstimmkondensator* (*Trimmer*), der unmittelbar an die Spule angeschlossen wird und dessen Kapazität man von 5 pF bis 30 pF verändern kann. Dieser Kondensator beeinflußt den Schwingkreis besonders dann sehr stark, wenn der Rotor des Drehkondensators ganz herausgedreht ist, d.h. im Bereich der höchsten Frequenzen des geschalteten Wellenbereichs.
Die Schwingkreisabstimmung ist besonders bequem, wenn die Spule einen Ferritkern enthält. Schrauben wir den Kern in die Spule hinein, so steigt die Induktivität, und wir erhalten eine kleinere Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Besteht die Spule aus 2 gesonderten Sektionen, so läßt sich ihre Induktivität dadurch verändern, daß man die Sektionen näher zusammen oder weiter voneinander entfernt anordnet. *Je näher die Sektionen zusammenliegen, desto stärker wirken die Magnetfelder zusammen, d.h., sie addieren sich und erhöhen auf diese Weise die Spuleninduktivität.*
Das eben Erläuterte ist aber nur für den Fall richtig, wenn die beiden Spulensektionen einen einheitlichen Wickelsinn haben und das Ende der einen Sektion mit dem Anfang der anderen Sektion verbunden ist. Wird eine dieser beiden Bedingungen nicht erfüllt, so schwächen sich die Magnetfelder beider Sektionen, so daß bei der Annäherung der Sektionen die Induktivität nicht zunimmt, sondern sich im Gegenteil verringert. Das Nachstimmen eines Schwingkreises durch Verändern der Schwingkreisinduktivität führen wir zweckmäßig dann durch, wenn die Kapazität des Drehkondensators maximal ist, also dann, wenn der Nachstimmkondensator auf die Resonanzfrequenz kaum Einfluß hat.

14. Bau eines abstimmbaren Detektorempfängers

Nach dem Schaltplan (s. Bild) können wir uns einen *durchstimmbaren Detektorempfänger für den Lang- und Mittelwellenbereich* aufbauen. Dank der Resonanzeigenschaften des Schwingkreises hat dieser Empfänger schon eine gewisse Trennschärfe, und die empfangenen Rundfunkstationen ertönen weitaus lauter als bei unserem ersten einfachen Detektorempfänger.
Haben wir den Empfänger zusammengebaut, so können wir eine ganze Menge von dem, was bisher theoretisch beschrieben wurde, praktisch nachprüfen. Zunächst probieren wir verschiedene Antennenankopplungen, dann untersuchen wir, wie sich ein Shunten des Schwingkreises auf die Trennschärfe und auf die Empfindlichkeit unseres Empfängers auswirkt.



Schaltung eines Detektorempfängers

Weiterhin schalten wir den Detektor nur an einen Teil der Schwingkreisspule und kontrollieren, welche Auswirkungen das hat. Der Zusammenbau des Empfängers führt uns durch entsprechende Wahl der Schwingkreisspule und des Nachstimmkondensators dazu, eine Abstimmung auf einen Sender zu erreichen, den wir dann auf einer *Skala* vermerken. Die Skala selbst fertigen wir uns nach dem Vorbild einer fabrikmäßig hergestellten Skala an.

Auf den ersten Blick könnte man sagen, daß sich mit mehreren gleichwertigen Schwingkreisen die Trennschärfe und die Empfindlichkeit unseres Empfängers noch steigern ließe. Was die Trennschärfe betrifft, so erreichen wir zweifellos durch mehrere gleichwertige Schwingkreise eine Verbesserung.

Sind in einem Empfänger 2 Schwingkreise vorhanden, und jeder von ihnen schwächt die störenden Rundfunkstationen um den 3fachen Wert, so beträgt die Gesamttrennschärfe 9. Die Steigerung der Schwingkreiszahl ist einer der Hauptwege, die Trennschärfe zu erhöhen.

Nun zur Empfindlichkeit.

Bei diesem Problem helfen uns viele Schwingkreise überhaupt nicht weiter.

Wir hatten festgestellt, daß die Energie, die aus der Antenne in den Schwingkreis gelangt, die Verluste kompensiert. Je größer die Energie ist, die der Schwingkreis erhält, desto stärker wird auch der Schwingkreisstrom. Davon können wir ableiten, daß auch die Schwingkreisspannung unter diesen Umständen ansteigt und der Detektor eine größere Spannung zur Verfügung hat.

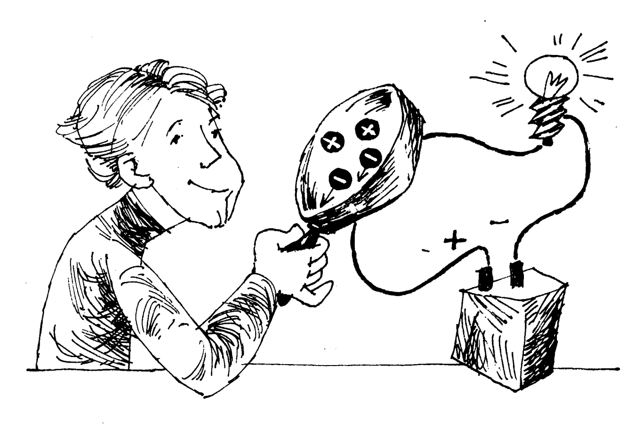
Haben wir nun in einem Detektorempfänger zwei Schwingkreise, so verteilt sich die Antennenenergie auf beide. Der Strom in jedem der Schwingkreise ist jetzt kleiner als der Strom in dem 1kreisigen Empfänger. Es bleibt sich gleich, an welchen der beiden Schwingkreise wir den Detektor anschließen. In jedem Fall erhöhen wir nicht die Empfindlichkeit, sondern wir verschlechtern sie im Verhältnis zu einem 1kreisigen Empfänger.

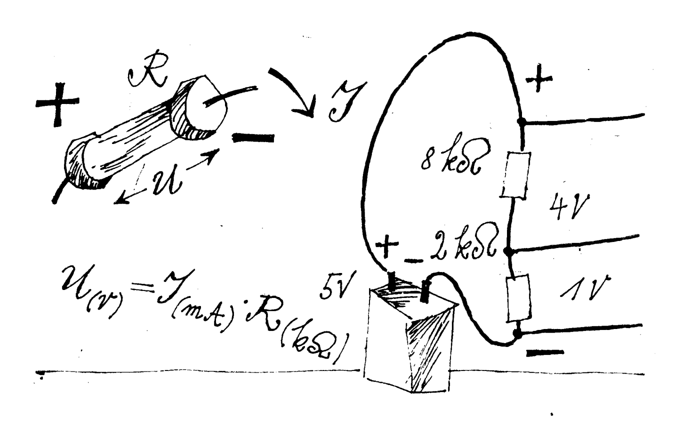
Für den lautstarken Empfang mehrerer Rundfunkstationen ist es erforderlich, die in der Antenne vorhandene Signalleistung milliardenfach zu verstärken. Eine derartig große Verstärkung erreichen wir mit Transistoren und Elektronenröhren. Wie diese Bauelemente der Funktechnik arbeiten, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

15. Verstärkung der ankommenden Signale

Mit Hilfe eines Schwingkreises ist es uns gelungen, die Empfängerempfindlichkeit um ein Weniges zu steigern. Außerdem hatten wir durch den Schwingkreis die Möglichkeit, die Energie, die uns die Antenne liefert, besser auszunutzen. Die Signale, die in der Antenne wirken, sind aber oft so klein (millionstel oder milliardstel Watt), daß der Schwingkreis nicht auf sie reagiert. Wir müssen also einen neuen Weg suchen, um die Lautstärke des Empfängers zu steigern. Dabei helfen uns die *Elektronenröhren* und die *Transistoren*. Mit ihnen können wir die empfangenen Signale milliardenfach verstärken.
Elektronenröhren und Transistoren sind die wichtigsten Bauelemente in allen Funkgeräten, so auch in unserem Empfänger. Bevor wir die Schaltungen verschiedener Empfänger betrachten, wollen wir die Wirkungsweise und den Aufbau der Elektronenröhre sowie ihres nächsten Verwandten, des Transistors, untersuchen.
Beginnen wir damit, daß strenggenommen weder eine Elektronenröhre noch ein Transistor elektrische Signale direkt verstärken kann. Das schwache Signal, das wir einer Elektronenröhre oder einem Transistor zuführen, bleibt als schwaches Signal erhalten, aber es steuert über die Verstärkerelemente leistungsstarke Energiequellen etwa so, wie der Pilot eines schweren Transportflugzeugs durch einen verhältnismäßig kleinen Steuerknüppel das ganze Flugzeug mit Leichtigkeit beherrscht. Genauso wie das Flugzeug auf jede Ruderstellung reagiert, so ändert sich auch der Strom am Verstärkerausgang im Rhythmus des zu verstärkenden Signals.
Im folgenden wollen wir uns nun mit dem Wirkungsprinzip eines Transistors und einer Elektronenröhre, mit den haupt-

sächlichsten Röhrentypen und ihrer Stromversorgung befassen. Diese Kenntnisse sind notwendig, um später praktische Schaltungen von *HF-Verstärkern* und *NF-Verstärkern*, die in unserem Empfänger vorkommen, verstehen zu können.
Die Verstärkerröhre oder der Transistor bildet zusammen mit allen erforderlichen Bauelementen (Widerständen, Kondensatoren usw.) die sogenannte *Verstärkerstufe*. Dort, wo die Verstärkung einer Stufe nicht ausreicht, setzt man 2, 3 oder mehr Stufen ein. Das Signal, das in einer Stufe zunächst nur wenig verstärkt wurde, gelangt an die 2. Verstärkerstufe, in der es weiter verstärkt wird. Von der 2. Stufe kommt das Signal zur 3. Stufe und so weiter.
Damit die Wirkungsweise von Röhrenverstärkern und Transistorverstärkern leichter verständlich wird, wollen wir uns 5 Regeln aus der Elektronik, die bereits behandelt wurden, in Erinnerung rufen. Bei Untersuchung der Wirkungsweise von Verstärkern werden wir diesen Regeln ständig begegnen.
Im folgenden Text sind die jeweils gültigen Regeln durch eine Zahl in eckiger Klammer gekennzeichnet.
[1] Elektrischer Strom stellt eine geordnete Bewegung sowohl positiver als auch negativer Ladung dar. Die negativen Ladungen (z.B. Elektronen) fließen von der Stelle, an der





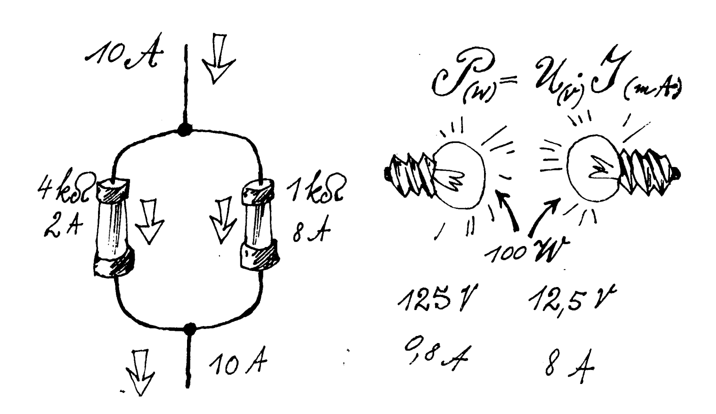
sie in Überschuß vorhanden sind (Minus) dorthin, wo ein Elektronenmangel besteht (Plus).

[2] Legt man an einen Widerstand R eine Spannung U, so verursacht die Spannung einen Strom I, der durch den Widerstand fließt. Die Spannung U fällt dabei am Widerstand ab.

[3] 2 (und mehr) Widerstände, die in Reihe geschaltet und an eine Stromquelle angeschlossen sind, bilden einen Spannungsteiler. An jedem Widerstand wirkt ein Teil der Gesamtspannung der Stromquelle. Je größer der jeweilige Widerstand, desto größer auch der Teil der Spannung, die an ihm wirkt (abfällt). Im Verhältnis zu einem beliebigen Abgriff (s. Bild oben) ist an dem Spannungsteiler an einem Anschluß eine positive, am anderen Anschluß eine negative Spannung vorhanden.

[4] Ein Strom, der durch 2 parallelgeschaltete Widerstände fließt, verzweigt sich. Durch den jeweils kleineren Widerstand fließt der größere Strom (vgl. S. 72, Bild links).

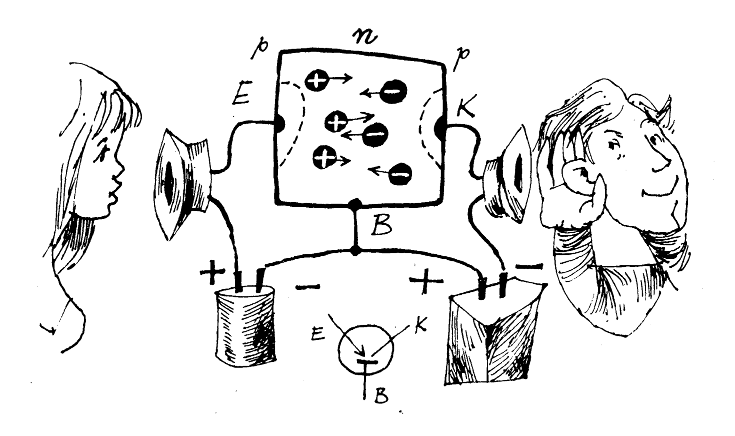
[5] Ein elektrischer Strom I, der durch einen beliebigen Widerstand R fließt, erzeugt an ihm einen bestimmten Leistungsabfall P. Diese Leistung hängt direkt ab von dem Strom, der durch den Widerstand fließt und von der Spannung, die an ihm wirkt. Je größer Strom und Spannung



sind, desto größer ist auch die Leistung P. Das bedeutet, man kann die gleiche Leistung durch einen hohen Strom bei geringer Spannung oder durch hohe Spannung und geringen Strom erreichen (Bild rechts).

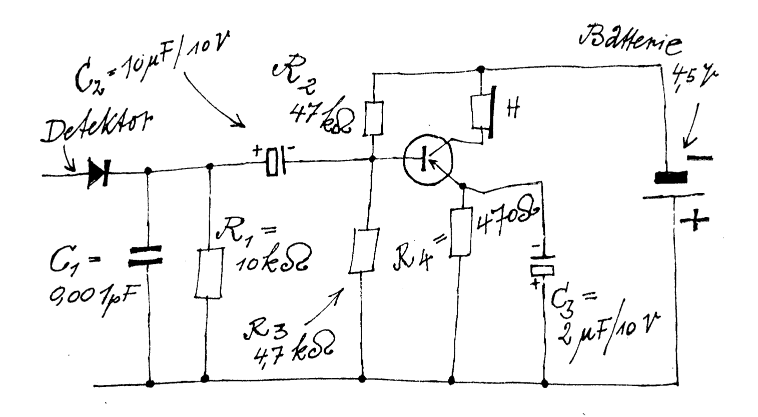
16. Der Transistor verstärkt

Heute sind *Flächentransistoren vom Typ pnp* (positiv-negativ-positiv) sehr weit verbreitet. Den Hauptbestandteil eines derartigen Transistors bildet ein Germaniumkristall, in dem ein bestimmter Elektronenüberschuß (n-Gebiet) vorhanden ist. An 2 Stellen sind in den Germaniumkristall Indiumperlen eingeschmolzen. An den Berührungsflächen zwischen Indium und Germanium entsteht ein Überschuß an positiven Ladungsträgern (p-Gebiet). Es bilden sich in dem Transistor 2 pn-Übergänge, so daß man den pnp-Transistor als 2 Flächendioden (Halbleiterdioden) mit einem gemeinsamen n-Gebiet betrachten kann. Es ist zu bemerken, daß bei Flächendioden der pn-Übergang ebenfalls durch Verschmelzen eines Indiumplättchens mit dem Germaniumkristall zustande kommt.
Eine Indiumperle, mit dem an ihr entstehenden p-Gebiet bezeichnet man als *Emitter* (er emittiert Ladungsträger). Der zweite Indiumanschluß heißt *Kollektor* (er sammelt die Ladungsträger). Der Germaniumkristall selbst aber (das n-Gebiet) heißt *Basis*.
Das Transistorgehäuse besteht gewöhnlich aus Metall oder Plast. Aus dem Gehäuse ragen durch Glasröhrchen oder Keramikröhrchen seine 3 Anschlüsse: der Kollektoranschluß, der Emitteranschluß und der Basisanschluß.
Soll ein Transistor als Verstärker arbeiten, so schaltet man zwischen Basis und Kollektor eine Batterie (ihre Spannung beträgt meist einige Volt), die die Energie liefert. Den Plusanschluß der Kollektorbatterie verbinden wir mit der Basis, dem n-Gebiet, und den Minuspol mit dem Kollektor, dem p-Gebiet. Der pn-Übergang zwischen Basis und Kollektor bildet jetzt praktisch eine Diode, die in Sperrichtung geschaltet ist und fast keinen Strom durchläßt.



Auf den Emitter geben wir umgekehrt eine kleine (gewöhnlich einige zehntel Volt) positive Spannung, so daß der pn-Übergang zwischen Emitter und Basis (Emitterübergang) ebenfalls eine Diode darstellt, die aber in Durchlaßrichtung geschaltet ist und Strom sehr gut leitet.
Beide pn-Übergänge (den Emitterübergang und den Kollektorübergang) dürfen wir aber nicht als 2 gesonderte, voneinander isolierte Halbleiterdioden betrachten, da sie eine gemeinsame Basis n, den Germaniumkristall, haben. Aus diesem Grund entsteht, wenn im Emitterstromkreis Strom fließt, auch im Kollektorstromkreis ein Strom. Fast alle positiven Ladungen, die aus dem Emitter in die Basis fließen, beginnen augenblicklich sich unter dem Einfluß der negativen Spannung am Kollektor zu ihm hin zu bewegen (siehe Bild oben). Die Kollektorspannung hilft den positiven Ladungen sozusagen, den Widerstand des Kollektorübergangs leichter zu überwinden. Mehr noch, wenn in den Kollektorstromkreis ein bestimmter Widerstand (Belastungswiderstand) eingeschaltet wird, überwindet der Kollektorstrom auch diesen Widerstand, indem er aus der Batterie eine bestimmte Energie verbraucht und an dem Widerstand einen Leistungsabfall erzeugt [5].
Eine Wechselspannung, die verstärkt werden soll (z.B. eine

HF-Spannung, die an einem Schwingkreis wirkt, oder eine NF-Spannung, die man hinter dem Detektor erhält), wird dem Transistor so zugeführt, daß sie zwischen Emitter und Basis wirkt, auf diese Weise also die Stromstärke im Emitterübergang steuert.
Durch die zu verstärkende Wechselspannung verändert sich der Strom im Emitterübergang, d.h., es ändert sich die Anzahl der positiven Ladungen, die aus dem Emitter in die Basis eindringen und von dort in den Kollektorstromkreis übergehen. Auf diese Weise wechselt auch der Kollektorstrom im Rhythmus des zu verstärkenden Signals — es entsteht eine *leistungsfähige Kopie* des an den Transistor gelangenden Signals. Die Energie, die zur Erzeugung der *Signalkopie* benötigt wird, kommt aus der Kollektorbatterie. Die Rolle des Emitterübergangs beschränkt sich darauf, genügend positive Ladungsträger zu liefern und die Steuerung der zur Verfügung gestellten Ladungen im Rhythmus des zu verstärkenden Signals vorzunehmen.
Wir müssen beachten, daß die Stromstärke im Kollektorstromkreis fast mit der im Emitterstromkreis übereinstimmt (der Kollektorstrom ist sogar etwas kleiner als der Emitterstrom). Das leistungsstarke Ausgangssignal am Transistorausgang entsteht also daraus, daß der Kollektorstrom am Belastungswiderstand (Arbeitswiderstand) eine größere Spannung erzeugt, als die Spannung des zu verstärkenden Signals ausmacht — siehe Regel [2] und [5] S. 71.
Bild S. 76 zeigt einen einfachen *Niederfrequenzverstärker* für einen Detektorempfänger. Für die Stromversorgung dieses Verstärkers reicht eine Taschenlampenbatterie aus. Die kleine positive Emitterspannung, die bereits erwähnt wurde, gewinnt man nicht aus einer gesonderten Batterie, sondern mit Hilfe eines *Spannungsteilers* (R2, R3). Die Transistorbasis wird zu diesem Zweck an einen bestimmten Punkt des Spannungsteilers angeschlossen. Auf diese Weise ergibt sich am Emitter eine positive, am Kollektor eine negative Spannung (im Verhältnis zur Basis) [3].



Handelsübliche Transistortypen der DDR sind: OC 810 ... OC 872.
Mit dem Arbeitswiderstand eines Verstärkers, mit den Methoden der Signalübertragung von einer Stufe zur anderen, mit dem Aussieben von Gleich- und Wechselströmen, die in Verstärkern des öfteren durch dieselben Leitungen fließen, werden wir uns bei der Untersuchung von Röhrenverstärkern beschäftigen.

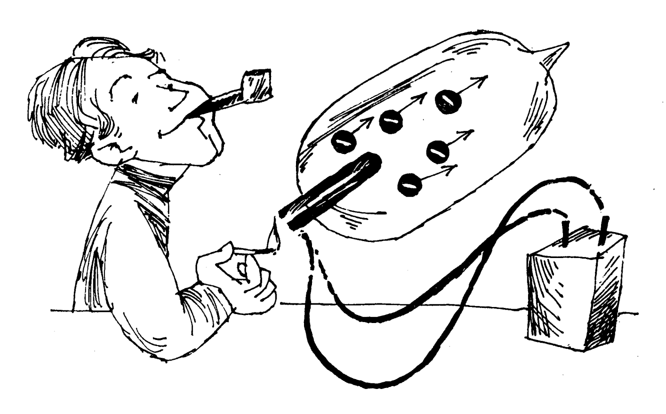
17. Die Verstärkerröhre

In der Elektronenröhre wie im Transistor erreichen wir dadurch eine Verstärkung, daß das schwache elektrische Signal den durch die Röhre fließenden Strom (Ladungsträgerbewegung) steuert. Dieser Strom kann durch die äußere Stromquelle eine beträchtliche Leistung entwickeln.
Im Unterschied zu einem Transistor laufen die Prozesse in einer Elektronenröhre nicht in mikroskopisch kleinen Germaniumplättchen oder Siliziumplättchen ab, sondern in einem Vakuum — in einem Glaskolben (oft auch in einem Metall- oder Metall-Keramik-Kolben), der luftleer gepumpt ist (Vakuum).
In einem Transistor gibt es immer freie elektrische Ladungsträger, d.h. Ladungen, die sich unter dem Einfluß einer bestimmten Spannung verlagern können und auf diese Weise den Emitterstrom oder den Kollektorstrom erzeugen. Im Vakuum dagegen gibt es praktisch keine freien elektrischen Ladungen, so daß ein spezielles Element (die *Katode*) in den Röhrenkolben eingebaut werden muß.
Die Katode ist ein Metalldraht(-faden), durch den elektrischer Strom fließt, wenn man ihn an eine Heizbatterie oder einen Transformator anschließt. Der Heizstrom erhitzt die Katode ähnlich wie die Heizspirale einer Heizplatte. Die Katodentemperatur schwankt abhängig vom Katodentyp zwischen 800 °C bis 2500 °C. Wir wissen, daß im Metall immer sehr viel freie Elektronen vorhanden sind (das unterscheidet die Metalle auch von den Isolatoren), die sich ungeordnet im Raum zwischen den einzelnen Atomen bewegen. Je höher die Metalltemperatur, um so intensiver die ungeordnete Elektronenbewegung. Bei hohen Katodentemperaturen treten viele Elek-

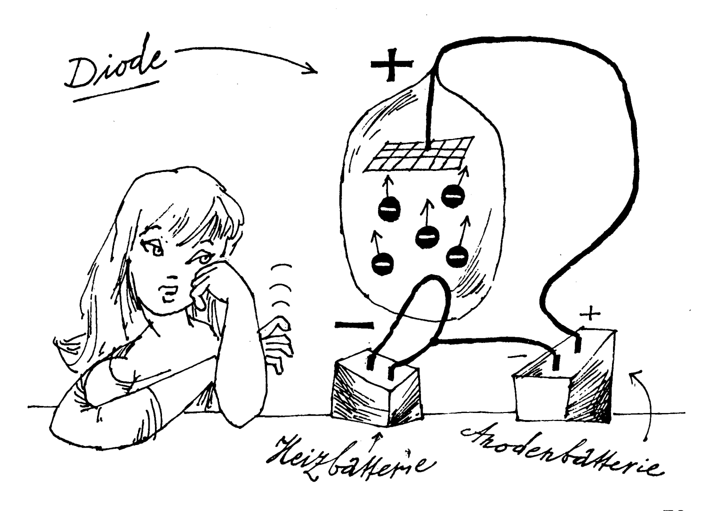
tronen aus dem Metall aus (man bezeichnet diese Erscheinung als Thermoelektronenemission), so daß im Vakuum des Röhrenkolbens freie elektrische Ladungen erscheinen (Bild unten). Jetzt zwingen wir die freien Elektronen, die aus der erhitzten Katode ausgetreten sind, geordnet in eine bestimmte Richtung zu fliegen. Mit anderen Worten, wir erzeugen in der Röhre einen elektrischen Strom. Zu diesem Zweck bringen wir in dem Glaskolben eine zweite Elektrode unter. Gewöhnlich ist das eine Metallplatte, die unweit der Katode angeordnet wird. Diese Elektrode bezeichnen wir als Anode, die auf diese Weise entstandene *Zweielektrodenröhre* als *Diode*.

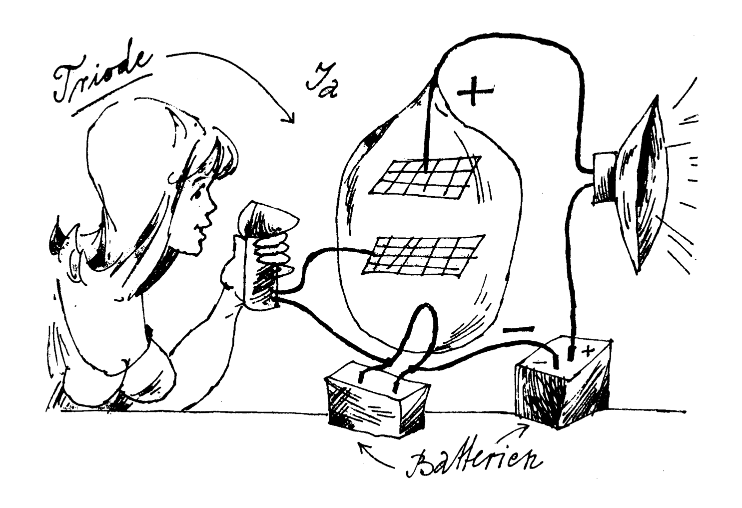
Wenn wir jetzt zwischen der *Anode* und der *Katode* eine Stromquelle (Batterie), die *Anodenbatterie* U_a, anschließen und den Pluspol mit der Anode verbinden, so werden alle aus der Katode austretenden Elektronen unter dem Einfluß der positiven Spannung an der Anode zu ihr hinfliegen. Als Ausgleich dafür fließen Elektronen aus der Anodenbatterie wieder zur Katode. Wir haben also innerhalb des Röhrenkolbens und außerhalb des Röhrenkolbens einen Stromfluß, den man als Anodenstrom bezeichnet. (Bild S. 79).

Der Anodenstrom einer Röhre verläuft in der gleichen Weise wie in einem Gleichrichter: Die Elektronen können sich zwar



von der Katode zur Anode bewegen, aber nicht umgekehrt, da die Anode nicht emissionsfähig ist.
Doch noch einmal zurück zum Transistor:
Im Transistor ändert sich der Kollektorstrom, weil sich unter dem Einfluß des zu verstärkenden Signals auch die Anzahl der Ladungsträger verändert, die aus dem Emitter über die Basis in den Kollektorstromkreis gelangt. Wenn wir nun den Strom in der Elektronenröhre genauso steuern wollten wie im Transistor, so müßten wir den zu verstärkenden Strom derart durch die Katode leiten, daß er die Katodentemperatur veränderte und auf diese Weise die Zahl der austretenden Elektronen steuerte. Es läßt sich leicht einsehen, daß das unmöglich ist, da das zu verstärkende Signal die Katode nicht einmal geringfügig erwärmen könnte. Außerdem kann die Katode auf Grund ihrer Wärmeträgheit (zum Erwärmen und zum Abkühlen benötigt die Katode eine bestimmte Zeit) den Veränderungen des zu verstärkenden Signals nicht folgen.
Für die Steuerung des Anodenstroms bringt man im Röhrenkolben eine weitere Elektrode unter — ein Metallgitter —, das zwischen Katode und Anode angebracht wird. Wirkt nun

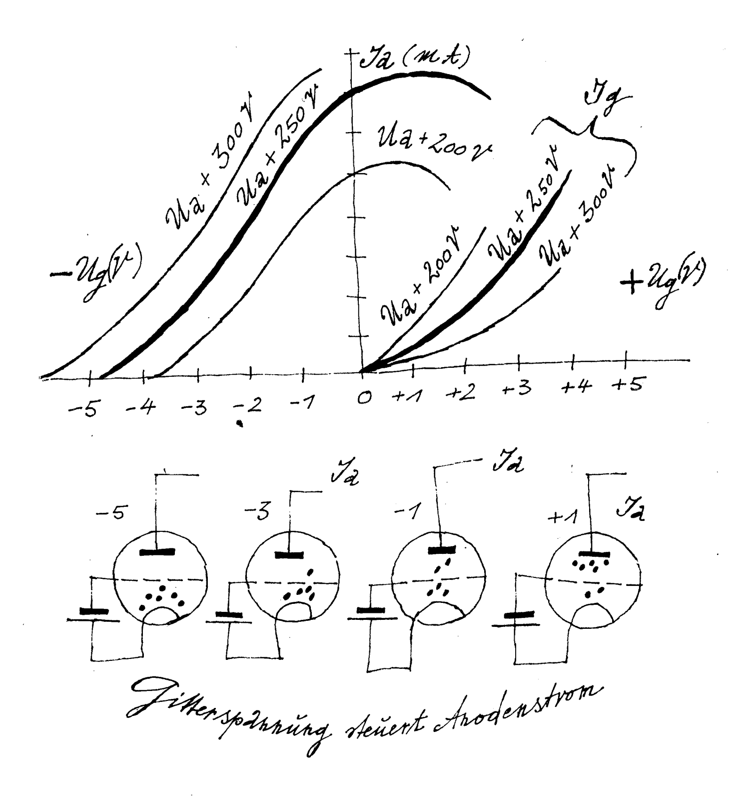




zwischen Gitter und Katode nur eine geringe Spannung, so beeinflußt diese den Anodenstrom sehr stark. Bei vielen Röhren reicht bereits eine negative Spannung von 5 bis 10 V aus (eine negative Gittervorspannung stößt die von der Katode ausgesandten Elektronen wieder ab), um den Anodenstrom, ungeachtet der anziehenden Wirkung der relativ hohen positiven *Anodenspannung** (gewöhnlich 50 bis 250 V), zu unterbrechen. In diesem Fall spricht man davon, daß die Röhre durch die Gitterspannung gesperrt ist.

Je kleiner die negative Gittervorspannung, um so schwächer werden die von der Katode emittierten Elektronen abgestoßen, und desto mehr von ihnen gelangen durch das Gitter an die Anode. Bei positiven Gitterspannungen behindert das Steuergitter den Elektronenstrom in der Röhre nicht, sondern unterstützt ihn und erhöht dadurch den Anodenstrom.

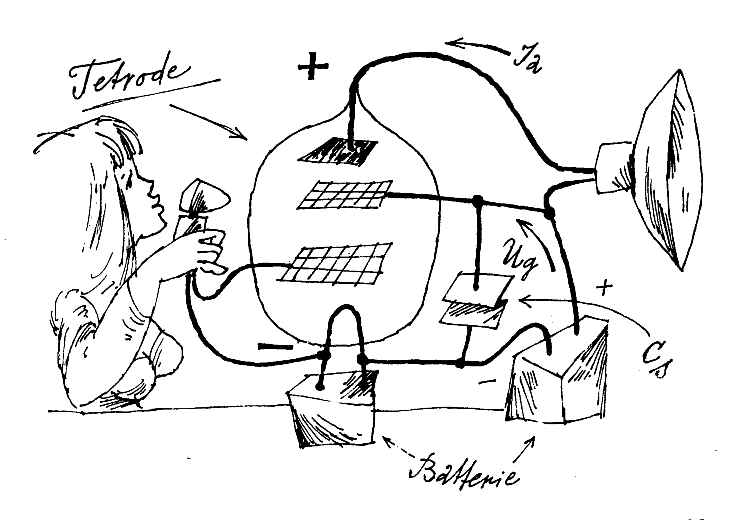
* Spricht man über eine Spannung an einer beliebigen Röhrenelektrode, z.B. am Steuergitter oder an der Anode, so ist zu berücksichtigen, daß diese Spannung zwischen der betreffenden Elektrode und der Katode gemessen wurde. Manchmal spricht man auch von *Minus* am Steuergitter und *Plus* an der Anode, und damit meint man eine positive oder eine negative Spannung an der betreffenden Elektrode.



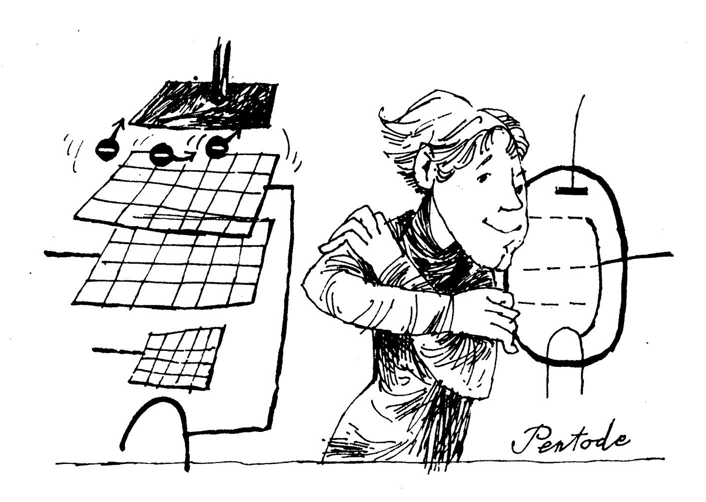
Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, daß bei positiven Gitterspannungen auch ein Teil der Elektronen am Steuergitter haftenbleibt, der dann durch den äußeren Gitterstromkreis wieder zur Katode zurückfließt. Mit anderen Worten, bei positiven Gitterspannungen entsteht in der Röhre ein Gitterstrom. Die Kennlinie, die uns zeigt, wie sich Anodenstrom und Gitterstrom bei Spannungsänderungen am Steuergitter verändern, heißt *Anodenstrom-Gitterspannungskennlinie* (*I_a/U_g-Kennlinie*) der Röhre. Mehrere Kennlinien, die bei verschiedenen Anodenspannungen aufgenommen wurden, bezeichnet man als *Kennlinienschar*. (siehe oben).

Sobald zwischen dem Steuergitter und der Katode die Wechselspannung eines zu verstärkenden Signals wirkt, beeinflußt diese den Anodenstrom. Um nun die Energie, des sich ändernden Anodenstroms auszunutzen, d.h., um eine *leistungsfähige Kopie* des ankommenden Signals zu gewinnen, schalten wir genau wie bei einem Transistor in den Anodenkreis der Röhre eine Belastung (Arbeitswiderstand) ein. Die Belastung kann ein gewöhnlicher Widerstand, ein Lautsprecher, ein Schwingkreis, ein Paar Kopfhörer usw. sein.
Abhängig von der Aufgabe, die die Verstärkerstufe zu erfüllen hat, strebt man danach, entweder einen großen Wechselstrom in der Belastung (dazu benutzt man einen kleinen Arbeitswiderstand) oder eine große Wechselspannung (wir verwenden einen großen Arbeitswiderstand) zu erzeugen. Bei beliebigen Strom- und Spannungsverhältnissen in der Belastung [5] ist der Leistungsabfall an dieser, d.h. die Leistung des verstärkten Signals, bedeutend größer als die Leistung im Steuergitterkreis, die aufgewendet wird, um den Anodenstrom zu steuern.
Die Verstärkerröhre, in der eine Anode, eine Katode und ein Steuergitter vorhanden sind, heißt *Triode* (Dreielektrodenröhre). Die Triode kommt sehr oft in NF-Verstärkern, ebenso häufig in UKW-Geräten vor.
Neben sehr vielen Vorteilen weist die Triode aber auch zwei wesentliche Nachteile auf. Der erste besteht darin, daß die Anode und das Steuergitter eine Kapazität C_{ag} bilden, dessen Kapazität gewöhnlich einige Pikofarad ausmacht (C_{ag} wird als *innere Röhrenkapazität* bezeichnet). Über die Anoden-Gitterkapazität C_{ag} wird Wechselstrom aus dem Anodenstromkreis in den Gitterstromkreis zurückgekoppelt. Mit anderen Worten, durch die Kapazität C_{ag} entsteht eine Rückkopplung zwischen der Anode und dem Steuergitter (Rückwirkung der Anode auf das Steuergitter), die die Verstärkungseigenschaften der Röhre stark herabsetzen kann oder zur Selbsterregung der Verstärkerstufe führt. *Bei einer Selbsterregung verwandelt*

sich der Verstärker in einen Generator (mit dieser Erscheinung befassen wir uns später).
Der zweite Nachteil der Triode besteht darin, daß beim Betrieb der Röhre in einer Verstärkerstufe die Anodenspannung zu bestimmten Zeiten sehr stark abnehmen kann. Das erklärt sich daraus, daß ein Teil der Spannung von der Anodenbatterie am Belastungswiderstand abfällt. Je größer der Anodenstrom, desto größer auch der Spannungsabfall am Arbeitswiderstand R_a, und desto weniger Anodenspannung wirkt tatsächlich an der Anode. Zu bestimmten Zeiten, wenn infolge des zu verstärkenden Signals der Anodenstrom stark ansteigt, beträgt beispielsweise die Anodenspannung nur noch einige Volt. Durch diese niedrige Anodenspannung werden auch nur wenig freie Elektronen angezogen, so daß der Anodenstrom unerwünscht zurückgeht.
Um diese Nachteile der Triode zu beseitigen, bringt man zwischen dem Steuergitter und der Anode eine weitere Elektrode unter. Das ist das sogenannte *Schirmgitter*, das über den Kondensator C_s mit der Katode verbunden wird. Außerdem erhält das Schirmgitter eine positive Spannung, die gewöhn-

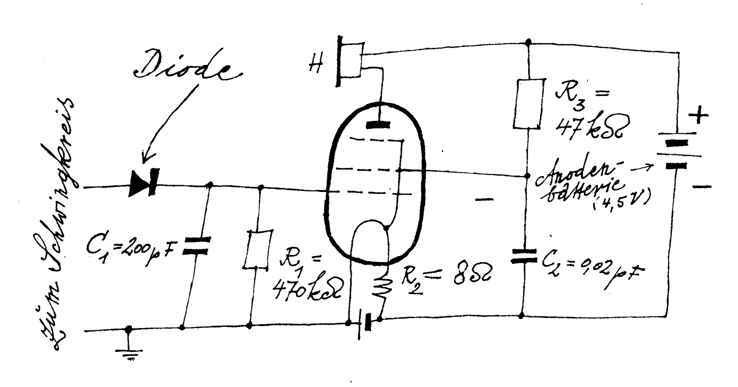


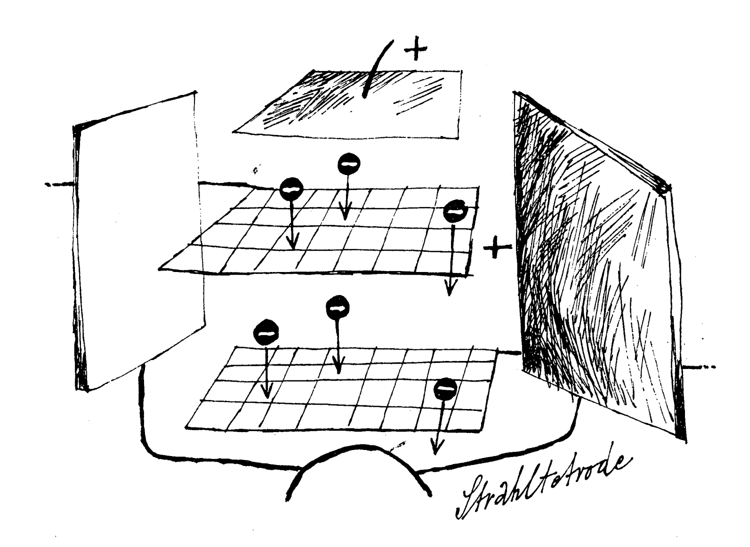
lich 50 bis 80 % der Anodenspannung beträgt. Eine Verstärkerröhre mit 4 Elektroden bezeichnen wir als *Tetrode.*
Durch das Einfügen dieser weiteren Elektrode in die Röhre entsteht eine zusätzliche Kapazität C_{as}. In diesem Fall bilden das Schirmgitter und die Anode die Kondensatorplatten. Jetzt fließt der Wechselstrom, der zuerst über die Kapazität C_{ag} floß und die Ursache für eine Rückkopplung war, nicht mehr in den Gitterstromkreis. Er wählt den Weg des geringsten Widerstands und fließt über die Kapazitäten C_{as} und C_s. Das ist gleichbedeutend mit einer Verringerung der inneren Röhrenkapazität. Auf diese Weise wird der erste Nachteil einer Triode beseitigt.
Die positive Schirmgitterspannung beschleunigt die Elektronenbewegung, so daß die Elektronen auch dann noch durch das Schirmgitter hindurch bis zur Anode gelangen, wenn die Anodenspannung stark abgefallen ist. Damit wäre auch der zweite Nachteil, den eine Triode aufweist, beseitigt. Bei Betrieb einer Tetrode stellen wir aber fest, daß ein Teil der Elektronen auf dem Schirmgitter verbleibt und im Schirmgitterstromkreis ein Strom fließt (der Schirmgitterstrom I_s), der 10- bis 20mal kleiner ist als der Anodenstrom.
Ungeachtet dessen, daß Tetroden sehr gute Verstärkungseigenschaften haben, werden sie heute nicht mehr eingesetzt. Der Grund dafür ist der *Dynatroneffekt.* Dieser Effekt besteht darin, daß die Elektronen, die an die Anode fliegen, aus dem Anodenmaterial wieder Elektronen — die sogenannten *Sekundärelektronen* — herausschlagen. In den Momenten, da die Anodenspannung sehr klein ist, fliegen die Sekundärelektronen unter dem Einfluß der höheren positiven Schirmgitterspannung auf das Schirmgitter. Auf diese Weise steigt der Schirmgitterstrom unnötig an und setzt den Anodenstrom herab. Der normale Betrieb der Verstärkerstufe wird dadurch gestört.
Um den Dynatroneffekt herabzusetzen, fügt man neben der Anode eine fünfte Elektrode in den Röhrenkolben ein — das sogenannte *Bremsgitter.* Damit erhalten wir eine *Fünfpolröhre — die Pentode.* Das Bremsgitter wird mit der Katode ver-



bunden (in vielen Röhren ist diese Verbindung bereits in der Röhre hergestellt), so daß an dieser Elektrode im Verhältnis zur Anode eine negative Spannung wirkt. Das Bremsgitter befördert die Sekundärelektronen aus der Anode wieder zu ihr zurück und wirkt auf diese Weise dem Dynatroneffekt entgegen. Die Schaltung einer Pentode zeigt das nachstehende Bild.

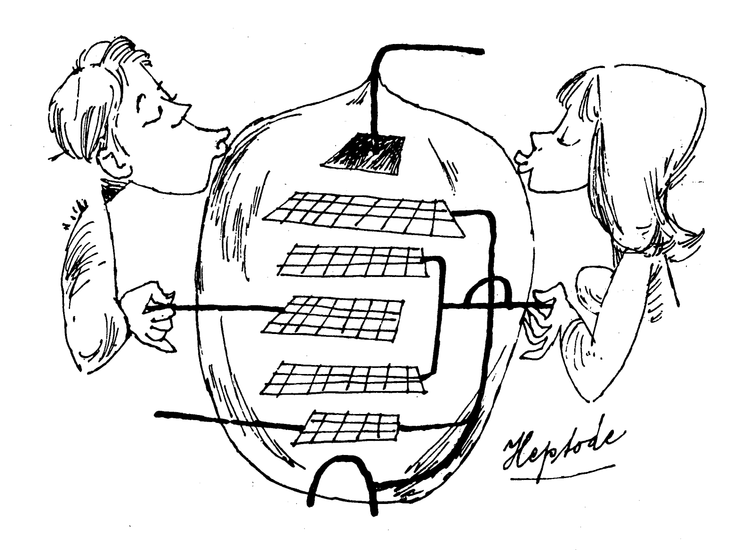
Es gibt auch einen anderen Weg, den Dynatroneffekt herabzusetzen. Die Elektroden einer Tetrode werden auf besondere



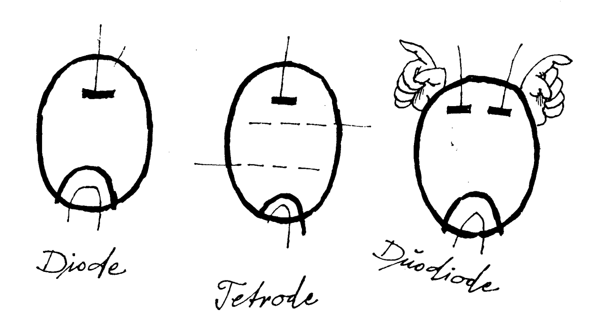


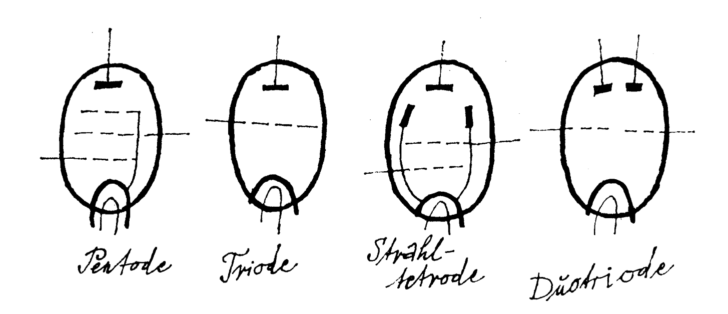
Art angeordnet und nahe der Anode Metallplatten untergebracht, so daß der Elektronenstrahl aus der Katode nicht in breiter Front die Anode erreicht, sondern strahlförmig gebündelt wird. Dank der hohen Konzentration verhalten sich die Elektronen wie ein Leiter, der von der Katode zur Anode führt. Dieser Leiter, der im Verhältnis zur Anode negativ ist, stößt die Sekundärelektronen ab. Eine so aufgebaute Röhre heißt *Strahltetrode.* Sie kommt sehr häufig vor.

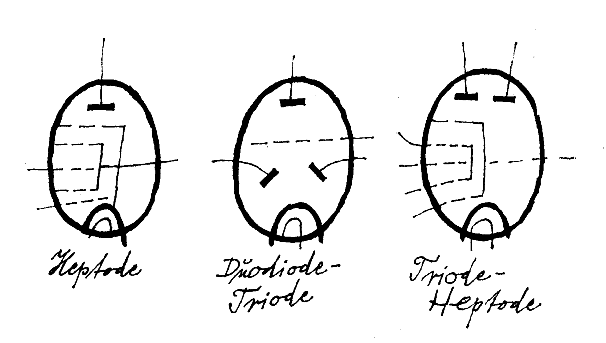
Außer den betrachteten Haupttypen von Verstärkerröhren gibt es auch Röhren für spezielle Zwecke. Die am häufigsten benutzte Spezialröhre ist die *Heptode.* In dieser Röhre finden wir 1 Anode, 1 Katode, 2 Steuer-, 1 Brems-, 2 Schirmgitter — insgesamt 7 Elektroden. Durch die beiden Steuergitter haben wir die Möglichkeit, den Anodenstrom gleichzeitig durch 2 Spannungen zu beeinflussen (auf diese Notwendigkeit kommen wir noch bei unserem Superhetempfänger zurück). Das zweite Schirmgitter ist zwischen den Steuergittern angeordnet und schwächt die gegenseitige Beeinflussung dieser Gitter ab.



Sehr häufig werden auch kombinierte Röhren verwendet, bei denen in einem Kolben 2, 3, teilweise auch 4 Röhrensysteme untergebracht sind. Zu den kombinierten Röhren gehören: *Duotrioden*, *Trioden-Pentoden*, *Trioden-Heptoden* und andere.




Pentode
Triode
Strahl-
tetrode
Duotriode


Heptode
Duodiode-
Triode
Triode-
Heptode

Inhaltsverzeichnis — Teil I

Inhaltsverzeichnis — Teil II — Der junge Funker · Band 11

Inhaltsverzeichnis — Teil III — Der junge Funker · Band 12

1.–10. Tausend

Deutscher Militärverlag · Berlin 1968

Lizenz-Nr. 5

Lektor: Sonja Topolov

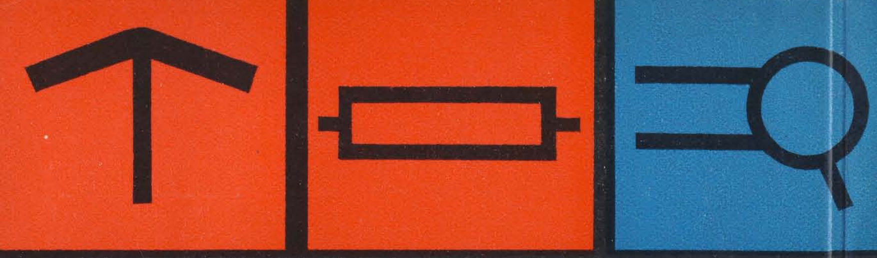
Illustrationen: Heinz Bormann

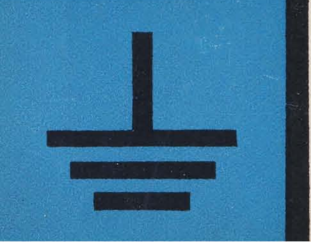
Korrektor: Reinhold Herrmann

Typografie: Dieter Lebek · Hersteller: Wolfgang Guthmann

Gesamtherstellung: Druckerei Volksstimme Magdeburg IV-14-48







DEUTSCHER
MILITÄR-
VERLAG

